

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Antonio Klasnić**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Student:

Doc. dr. sc. Vinko Šimunović

Antonio Klasnić

Zagreb, 2017.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ANTONIO KLASNIĆ** Mat. br.: 0035195027

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **NAPETOSNA KOROZIJA DIJELOVA ZRAKOPLOVA IZRAĐENIH OD VISOKOLEGIRANIH Cr-Ni ČELIKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **STRESS CORROSION CRACKING OF HIGHLY ALLOYED Cr-Ni AIRCRAFT COMPONENTS**

Opis zadatka:

Složene i zahtjevne zrakoplovne konstrukcije izrađuju se od različitih konstrukcijskih materijala koji moraju osigurati dugotrajnu i sigurnu eksploataciju. Za izradu pojedinih sustava i dijelova koriste se pri tom raznovrsni visokolegirani Cr-Ni čelici zbog njihove velike otpornosti na koroziju. Iako su Cr-Ni čelici otporni u mnogim korozivnim okruženjima, zabilježeni su brojni slučajevi oštećivanja pojedinih komponenti zrakoplova izrađenih od ovih materijala i to prvenstveno uslijed lokalnih korozijskih procesa. Posebno opasan proces oštećivanja predstavlja napetosa korozija kojoj su skloni Cr-Ni čelici austenitne strukture, a uslijed koje dolazi do neočekivanog i iznenadnog narušavanja mehaničkih svojstava što može imati vrlo ozbiljne posljedice.

U teorijskom dijelu rada potrebno je izučiti vrste, svojstva i područja primjene nehrđajućih Cr-Ni čelika koji se koriste u izradi zrakoplova te obraditi njihova svojstva korozijske postojanosti kao i najčešće lokalne korozijske fenomene. Detaljnije je potrebno proučiti fenomen napetosne korozije i dati prikaz takvih oštećenja na zrakoplovnim konstrukcijama.

U praktičnom dijelu rada treba provesti laboratorijska korozijska ispitivanja otpornosti na napetosnu koroziju različitih vrsta nehrđajućih čelika. Analizom dobivenih rezultata izvesti zaključke o osjetljivosti ispitivanih čelika na napetosnu koroziju, kao i o mogućnostima izbjegavanja ovog korozijskog fenomena.

U radu navesti korištenu literaturu te eventualnu dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Doc. dr. sc. Vinko Šimunović

  
Prof. dr. sc. Ivica Smojver

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studiranja i navedenu literaturu.

Zahvaljujem doc. dr. sc. Vinku Šimunoviću na mentorstvu, usmjeravanju u izradi završnog rada i savjetovanju u odabiru literature.

## SADRŽAJ

1.	UVOD .....	8
2.	NEHRĐAJUĆI ČELICI .....	10
2.1.	Podjela nehrđajućih čelika.....	11
2.1.1.	<i>Austenitni nehrđajući čelici</i> .....	12
2.1.2.	<i>Feritni nehrđajući čelici</i> .....	13
2.1.3.	<i>Martenzitni nehrđajući čelici</i> .....	14
2.1.4.	<i>Duplex nehrđajući čelici</i> .....	15
2.1.5.	<i>Korozijski postojani precipitacijski očvrnuti čelici</i> .....	16
2.2.	Korozijska postojanost nehrđajućih čelika.....	16
2.3.	Nehrđajući čelici u zrakoplovnim konstrukcijama.....	19
3.	VRSTE KOROZIJSKIH POJAVA KOD NEHRĐAJUĆIH ČELIKA .....	21
4.	NAPETOSNA KOROZIJA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA .....	23
4.1.	Mehanizam napetosne korozije na nehrđajućim čelicima.....	23
4.2.	Prikaz slučaja: pad borbenog zrakoplova F-16 zbog napetosne korozije nehrđajućeg čelika....	28
4.3.	Ispitivanje napetosne korozije na nehrđajućim čelicima.....	30
5.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	32
5.1.	Uvod.....	32
5.2.	Priprema uzoraka.....	32
5.3.	Korozijsko ispitivanje otpornosti na napetosnu koroziju prema ASTM G36 - 94 .....	35
5.4.	Vizualni pregled, stereomikroskopska ispitivanja, ispitivanja skenirajućim elektronskim mikroskopom.....	36
5.5.	Analiza rezultata.....	47
6.	ZAKLJUČAK .....	48

**Popis slika:**

Slika 1: Zbirni godišnji prikaz porasta proizvodnje nehrđajućih čelika [7].

Slika 2: Shematski prikaz korozijski postojanih čelika [9].

Slika 3: Prikaz žilavosti različitih nehrđajućih čelika [8].

Slika 4: Cijevi za hidrauliku i pneumatiku [10].

Slika 5: Prikaz primjene feritnog nehrđajućeg čelika [12].

Slika 6: Turbinske lopatice napravljene od martenzitnog nehrđajućeg čelika [13].

Slika 7: Mikrostruktura duplex čelika – podjednaki udjeli ferita i austenita [14].

Slika 8: Povećanje otpornosti na koroziju s povećanjem udjela kroma [17].

Slika 9: Prikaz pasivacije oštećenog sloja [18].

Slika 10: Debljina i sastav pasivnog sloja [8].

Slika 11: Skica potrebnih uvjeta za nastanak napetosne korozije; SCC (eng. Stress Corrosion Cracking) – napetosna korozija [28].

Slika 12: Razgranata struktura pukotina uslijed napetosne korozije austenitnog nehrđajućeg čelika [30, 31].

Slika 13: Detaljniji prikaz napetosne korozije kabla za upravljačke površine, čelik AISI 304. Vidljivo je da pukotina još nije potpuno perforirala stijenku materijala [32].

Slika 14: Vrijeme do pojave puknuća uslijed napetosne korozije u ovisnosti o udjelu nikla [17].

Slika 15: Zrakoplov F-16 (slika lijevo) i mjesto pada (slika desno) [33, 34].

Slika 16: Mehanizam zakreta lopatice i mjesto puknuća osovinice [3].

Slika 17: Površina prijeloma osovinice (slika lijevo), jamičasta korozijska oštećenja (slika u sredini), transkristalne napetosne pukotine (slika desno) [35].

Slika 18: Ovisnost točke vrelišta o udjelu magnezijevog klorida u vodenoj otopini [9].

Slika 19: Prikaz provedbe ispitivanja kemijskog sastava XRF metodom.

Slika 20: Početna faza savijanja (slika lijevo) i gotovo potpuno savinuti uzorak (slika desno).

Slika 21: Prikaz uzoraka prije provedbe ispitivanja.

Slika 22: Prikaz provedbe korozijskog ispitivanja i korištene aparature. Zagrijavanjem hidratizirane soli  $MgCl_2$  (lijevo) na 155 °C dobivena je ispitna otopina (desno).

Slika 23: Detaljniji prikaz provedbe korozijskog ispitivanja. Snimljeno tijekom ispitivanja uzoraka od austenitnih čelika.

Slika 24: Stereomikroskop Leica MZ6 – Laboratorij za zaštitu materijala FSB-a.

Slika 25: Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) – Laboratorij za materijalografiju FSB-a.

Slika 26: Prikaz rezultata – čelik AISI 304 L sa zaostalim naprezanjima.

Slika 27: Prikaz rezultata – čelik AISI 304 L sa zaostalim i narinutim naprezanjima.

Slika 28: Prikaz rezultata – čelik AISI 316 L sa zaostalim naprezanjima.

Slika 29: Prikaz rezultata – čelik AISI 316 L sa zaostalim i narinutim naprezanjima.

Slika 30: Prikaz rezultata – čelik AISI 430 sa zaostalim naprezanjima.

Slika 31: Prikaz rezultata – čelik AISI 430 sa zaostalim i narinutim naprezanjima.

Slika 32: SEM snimke površine loma austenitnog nehrđajućeg čelika (AISI 304 L).

Slika 33: SEM snimke uzorka od nehrđajućeg čelika (AISI 316 L). Uočljivo je širenje pukotina.

Slika 34: SEM snimke površine uzorka feritnog nehrđajućeg čelika (AISI 430) s vidljivim rupičastim korozijskim oštećenjem.

Slika 35: Komparativni prikaz ispitnih uzoraka s narinutim naprezanjima nakon provedenog korozijskog ispitivanja.

**Popis tablica:**

Tablica 1: Prikaz zrakoplovnih nesreća uzrokovanih korozijom [2], [3].

Tablica 2: Postotak kvarova [2].

Tablica 3: Sastav precipitacijski očvrnutih čelika [16].

Tablica 4: Prikaz primjene nehrđajućih čelika u zrakoplovstvu [19], [20], [21].

Tablica 5: Primjena nehrđajućih čelika u zrakoplovima [22].

Tablica 6: Vrste korozijskih pojava [15, 24, 25, 26, 27].

Tablica 7: Korozivna okruženja za nastanak napetosne korozije pojedinih materijala [29].

Tablica 8: Prikaz slučaja napetosne korozije dijela upravljačkog mehanizma koji upravlja kontrolnim površinama zrakoplova, čelik AISI 304 [13].

Tablica 9: Prikaz postojanosti nekih nehrđajućih čelika na napetosnu koroziju [24].

Tablica 10: Otpornost nehrđajućeg čelika na napetosnu koroziju u kloridnom okruženju s obzirom na udio silicija [17].

Tablica 11: Kemijski sastav ispitnih uzoraka.



## SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisani su nehrđajući čelici, njihova podjela i najvažnija svojstva. Opisan je mehanizam korozijske postojanosti ovih materijala, njihova primjena u zrakoplovstvu, kao i lokalni korozijski procesi kojima ovi materijali mogu biti skloni. Opisan je mehanizam napetosne korozije i izneseni su primjeri oštećivanja komponenti zrakoplova tim korozijskim procesom.

U eksperimentalnom dijelu rada na uzorcima izrađenim od austenitnih i feritnih nehrđajućih čelika provedeno je korozijsko ispitivanje otpornosti na napetosnu koroziju prema normi ASTM G36-94 te su analizirani rezultati ispitivanja.

**Ključne riječi:** napetosna korozija, nehrđajući čelici, zrakoplovstvo.

## SUMMARY

Stainless steels, their classification and their most important properties are described in theoretical part. The basis of stainless steel corrosion resistance, stainless steel applications in aerospace engineering and localized corrosion types which attack this material are presented. In addition, stress corrosion cracking (SCC) and several examples of aircraft component damage caused by SCC are described.

In experimental part stress corrosion cracking resistance of samples made from austenitic and ferritic stainless steels is tested according ASTM G36-94 standard and the results of conducted corrosion testing were analysed.

**Key words:** Stress corrosion cracking, stainless steel, aerospace engineering.

## 1. UVOD

Unatoč velikoj medijskoj pažnji koja prati zrakoplovne nesreće, zračni prijevoz je i dalje najsigurniji oblik transporta. Pouzdanost i sigurnost zrakoplovnih konstrukcija osigurava njihovo redovito održavanje popraćeno zahtjevnim standardima i strogo normiranim procedurama. Unatoč visokoj pouzdanosti, zrakoplovne konstrukcije izložene su velikom broju različitih štetnih čimbenika koji utječu na sigurnost pri njihovoj eksploataciji. Neke od pogrešaka u održavanju koje su rezultirale nesrećama čiji je uzrok bila i korozija prikazane su u tablici 1 [1].

**Tablica 1:** Prikaz zrakoplovnih nesreća uzrokovanih korozijom [2, 3].

	
<p>Havarija zrakoplova Jetstream 2014. godine. Nakon slijetanja avion je otklizao s piste nakon što se odvojilo lijevo podvozje. Uzrok puknuća je bila napetosna korozija.</p>	<p>2013. godine tijekom polijetanja pri brzini od 190 km/h dolazi do zapaljenja desnog motora zrakolova Airbus A330. Istraga je pokazala da je uzrok zapaljenja bio visokociklički umor materijala na jednoj od lopatica turbine iniciran rupičastom korozijom.</p>
	
<p>Pad borbenog zrakoplova F-16 koji se srušio 1992. godine između stambenih blokova, nasreću bez žrtava. Avion je pao zbog otkaza motora, a uzrok je lom osovinice u posljednjem stupnju kompresora do kojeg je došlo uslijed napetosne korozije.</p>	<p>Boeing 737 Aloha Airlinesa je 1988.g. ostao bez velikog dijela gornjeg dijela trupa za vrijeme leta. Do otkidanja je došlo uslijed visokocikličkog umora materijala i korozije. Poginula je jedna stjuardesa koja nije bila privezana u trenutku otkidanja dijela zrakoplova na visini leta od 7300 metara.</p>

U tablici 2 prikazan je odnos postotaka kvarova uzrokovanih pojedinim mehanizmima oštećivanja u zrakoplovnim komponentama u usporedbi s komponentama koje se koriste u svim ostalim inženjerskim konstrukcijama. Vidljivo je da je najveći dio kvarova uzrokovan umorom materijala, ali i da je vrlo visok udio kvarova posljedica korozijskog oštećivanja.

**Tablica 2:** Postotak kvarova [2].

Mehanizam oštećivanja	Postotak kvarova [%]	
	Nezrakoplovne komponente	Zrakoplovne komponente
Korozija	29	16
Umor	25	55
Krhki lom	16	-
Preopterećenje	11	14
Visokotemperaturna korozija	7	2
Napetostna korozija/korozijski umor	6	7
Puzanje	3	-
Trošenje/erozija	3	6

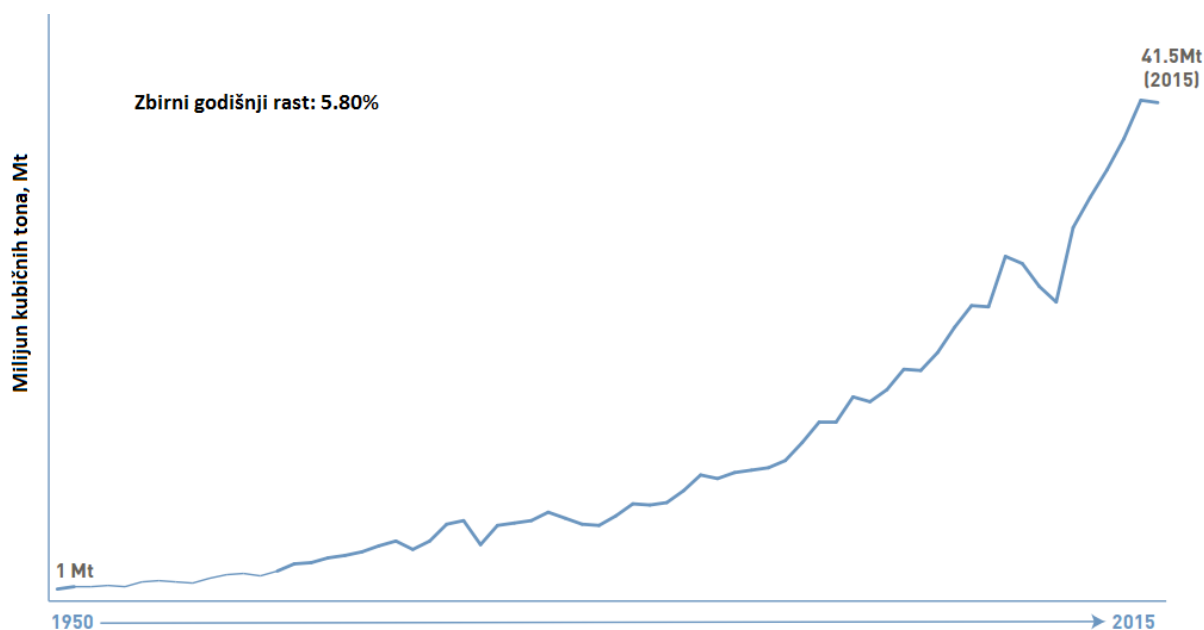
2002. godine na zahtjev Kongresa SAD-a izrađena je studija „Troškovi korozije i preventivne strategije u SAD-u“ kojom je procijenjeno da direktni troškovi što ih korozija izaziva gospodarstvu SAD-a iznose 276 mlrd. američkih dolara, tj. gotovo 3,1 % BDP-a. Tom studijom također je procijenjeno da direktni korozijski troškovi u transportnom sektoru iznose oko 29 mlrd. dolara, od kojih 2,2 mlrd. dolara godišnje čine troškovi u zrakoplovnom sektoru [4].

Svjetska korozijska organizacija (World Corrosion Organization, WCO), kao nevladino tijelo Ujedinjenih naroda, koje čine nacionalne strukovne udruge koje se bave zaštitom materijala od korozije, procjenjuje da su današnji troškovi korozije na globalnoj svjetskoj razini oko 2000 mlrd. američkih dolara, od čega se preko 30% može izbjeći postojećim znanjima i tehnologijama zaštite [5].

## 2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

Nehrđajući čelici (korozijski postojani čelici) su visokolegirani čelici koji sadrže sposobnost da se suprotstave korozijskoj agresiji medija većim ili manjim usporenjem njegova djelovanja. Ta se korozijska postojanost može utvrditi ispitivanjima: promjenama mase, volumenom izlučenog vodika (ili apsorbiranog kisika), smanjenjem debljine uzorka (obično lima), elektrokemijskim metodama, promjenom nekih mehaničkih ili fizikalnih svojstava, intenzivnošću strukturnih promjena itd [6].

Nehrđajući visokolegirani Cr-Ni čelici u upotrebi su već gotovo stotinu godina i čine važnu skupinu korozijski postojanih materijala. Mnoge od današnjih proizvodnih tehnologija, poput farmaceutske i prehrambene industrije, temelje se na primjeni ovih materijala. Prema podacima međunarodne udruge Stainless Steel Forum, ISSF, nehrđajući čelici čine skupinu materijala s najvećim godišnjim trendovima rasta, slika 1 [7].



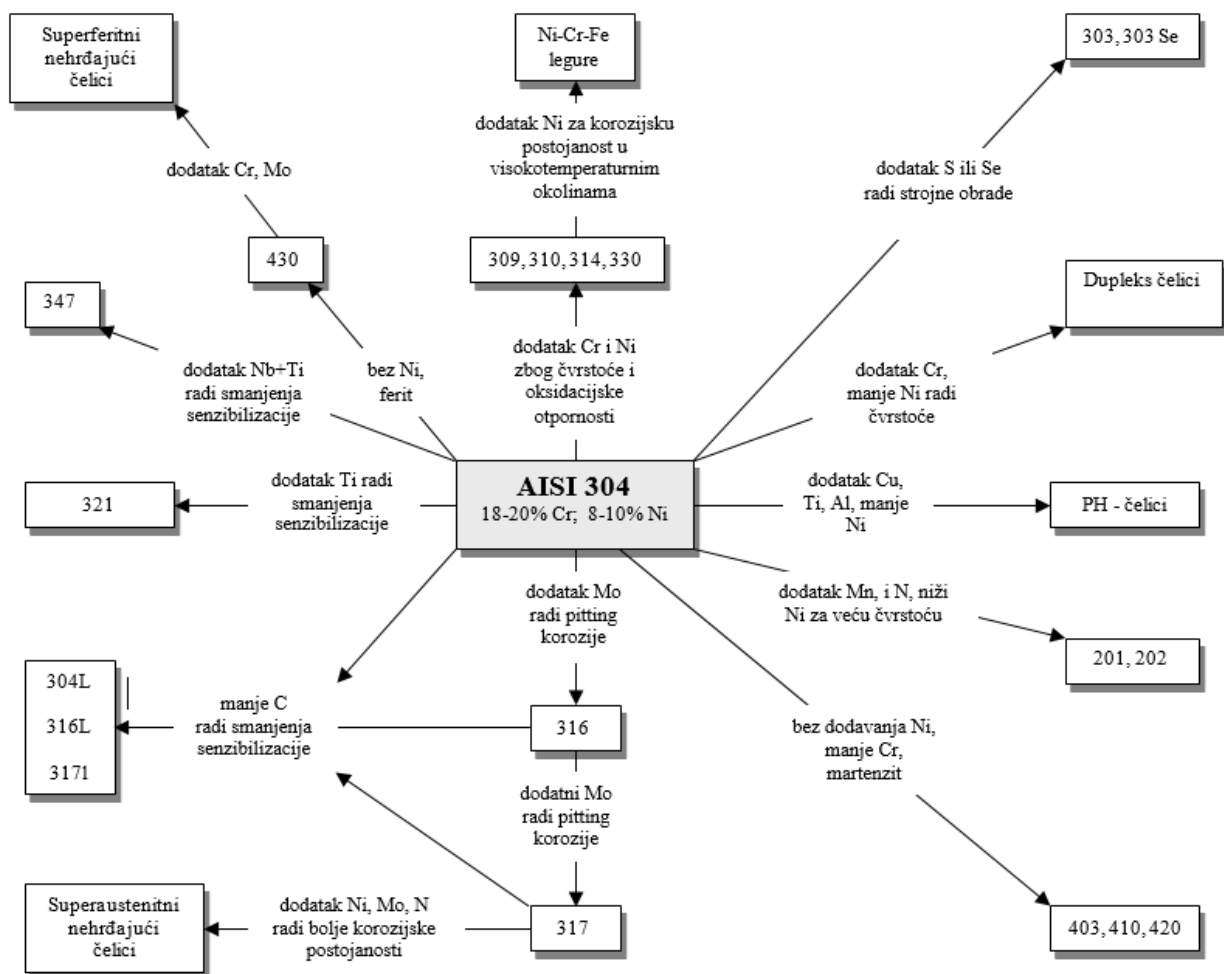
**Slika 1:** Zbirni godišnji prikaz porasta proizvodnje nehrđajućih čelika [7].

## 2.1. Podjela nehrđajućih čelika

Svojstva materijala ovise o njihovoj mikrostrukturi pa se tako i nehrđajući čelici razlikuju po mikrostrukturi. Dijelimo ih u pet skupina [8]:

- austenitni
- feritni
- martenzitni
- duplex
- precipitacijski očvršnuti čelici.

Shematski prikaz pojedinih skupina korozijski postojećih čelika dan je slikom 2.

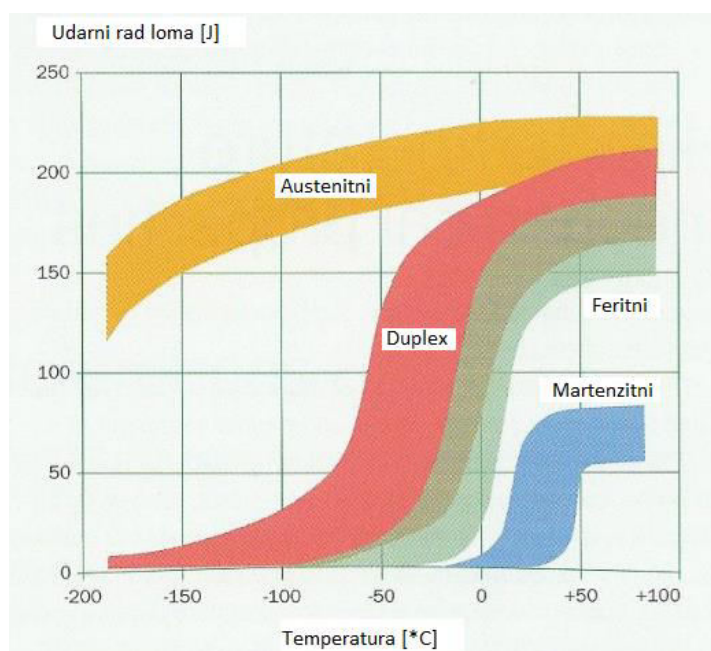


Slika 2: Shematski prikaz korozijski postojećih čelika [9].

### 2.1.1. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici čine najveću i najčešće korištenu skupinu nehrđajućih čelika. Najčešće primjenjivane legure iz skupine nehrđajućih čelika su legure serije 300 (prema oznakama Američkog instituta za željezo i čelik, eng. American Iron and Steel Institute - AISI). Osnovni čelik serije 300, AISI 304, ima vrlo dobru korozijsku postojanost u atmosferskim i oksidirajućim sredinama, odlična mehanička svojstva, vrlo dobru zavarljivost i vrlo dobru čvrstoću kod povišenih temperatura. Austenitni čelici nisu magnetični i imaju relativno nisku smičnu čvrstoću, ali visoku vlačnu čvrstoću i dobru duktilnost. Austenitna mikrostruktura prisutna je na svim temperaturama (od 0°C pa sve do temperature taljenja), a to omogućuje visok postotak nikla kao legirnog elementa. Austenit je kristal mješanac željeza i ugljika te kristalizira plošno centriranom kubičnom rešetkom (FCC). Za razliku od BCC (prostorno centrirana kubična rešetka) rešetke, FCC rešetka sadrži veći broj kliznih ravnina pa je zbog toga ova skupina čelika vrlo dobro plastično obradiva.

Iz slike 3 se uočava vrlo dobro svojstvo zadržavanja žilavosti u visokim vrijednostima pri niskim temperaturama što austenitne nehrđajuće čelike stavlja u veliku prednost u primjeni za takve uvjete eksploatacije [9].



**Slika 3:** Prikaz žilavosti različitih nehrđajućih čelika [8].

Kako austenitni čelici nisu magnetični, a uz to imaju visoku vlačnu čvrstoću vrlo su pogodni za korištenje u visokotlačnim hidrauličkim i pneumatskim sustavima u zrakoplovu. Prikaz cijevi za hidrauliku i pneumatiku od austenitnih nehrđajućih čelika je na slici 4 [10].



**Slika 4:** Cijevi za hidrauliku i pneumatiku [10].

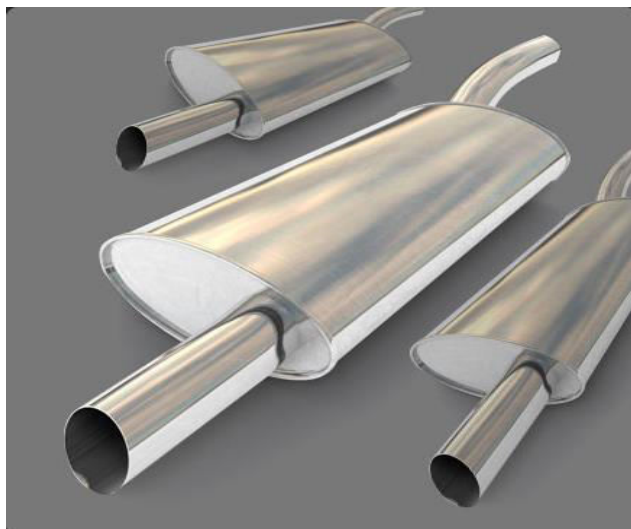
Kombinacijom povišenja i smanjenja postotka pojedinih legirnih elemenata lako se mijenjaju svojstva ovim materijalima. Smanjenjem postotka ugljika i legiranjem jakim karbidotvorcima (Ti, Nb) dobiveni su ELC čelici (eng. Extra low carbon) i time je smanjena opasnost od stvaranja opasnog karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  čime se postiže bolja korozijska postojanost. Dodavanjem molibdena dodatno se poboljšava korozijska otpornost (posebno na jamičastu koroziju – materijali AISI 316, AISI 317). Ukoliko se sadržaj nikla (maksimalno 7%) djelomično zamijeni manganom (od 4 do 15,5%) te uz dodatak dušika dobivamo čelike serije 200. Postupcima hladne deformacije čelici serije 200 dostižu vrijednost vlačne čvrstoće i do  $1200 \text{ N/mm}^2$ . Austenitni nehrđajući čelici legirani dušikom imaju dodatno povećanu postojanost na napetosnu koroziju, a dušik kao legirni element povoljno djeluje i na povećavanje postojanosti prema jamičastoj koroziji. Austenitni čelici visokolegirani molibdenom (do 6%) nazivaju se još i superaustenitnim čelicima. Ti čelici imaju dobru strukturnu stabilnost i odličnu korozijsku postojanost. Znatno im je poboljšana i čvrstoća. Osim kroma, nikla i molibdena sadržavaju i dušik, bakar i volfram [9].

### **2.1.2. Feritni nehrđajući čelici**

Feritni nehrđajući čelici imaju u potpunosti feritnu mikrostrukturu uz mali dodatak stabilnih karbida i nitrida. Ova vrsta nehrđajućeg čelika ima jedinstveno svojstvo otpornosti prema



napetosnoj koroziji u okruženju s kloridima. Međutim, žilavost mu vrlo brzo pada na niskim temperaturama gdje dolazi do opasnosti od krhkog loma [11]. Feritni nehrđajući čelici koriste se u automobilskoj industriji za izradu ispušnih sustava, slika 5.



**Slika 5:** Prikaz primjene feritnog nehrđajućeg čelika [12].

Koriste se još u izmjenjivačima topline, plamenicima, dijelovima u pećima [12]. Feritni nehrđajući čelici imaju prostorno centriranu kubičnu rešetku isto kao i željezo pri sobnoj temperaturi. Oni su magnetični i ne mogu biti očvršnuti toplinskom obradom. Oni kao takvi nemaju visoku vlačnu čvrstoću koja iznosi od 275 do 350 N/mm<sup>2</sup>. Uz svoje prednosti kao otpornost na kloridnu napetosnu koroziju i atmosfersku koroziju feritni nehrđajući čelici imaju relativno nisku cijenu s obzirom na ostale nehrđajuće čelike zbog manjeg udjela legiranih elemenata [9].

### ***2.1.3. Martenzitni nehrđajući čelici***

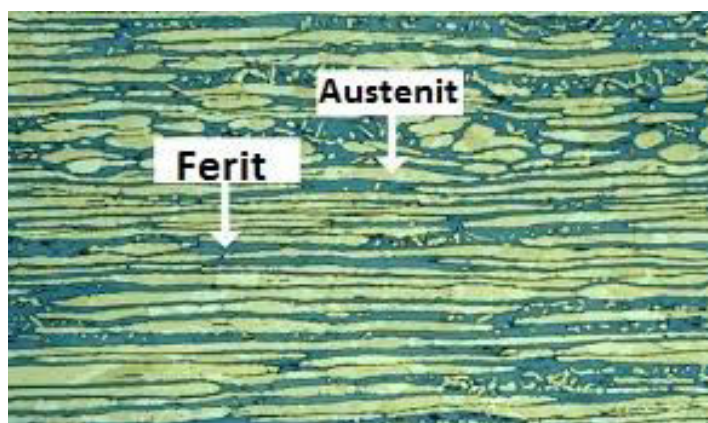
Martenzitni nehrđajući čelici su najmanja skupina nehrđajućih čelika. Za razliku od ostalih nehrđajućih čelika martenzitni imaju nešto veći udio ugljika i dušika kako bi se povećala čvrstoća. Oni ne sadrže nikal i molibden ili ih sadrže u vrlo malim količinama. Često im se dodaje sumpor u svrhu bolje obradljivosti. Oni su očvršnuti i magnetični [8]. Na slici 6 je prikaz primjene martenzitnog nehrđajućeg čelika. Još se primjenjuju kao medicinski instrumenti (npr. skalpeli).



**Slika 6:** Turbinske lopaticice napravljene od martenzitnog nehrđajućeg čelika [13].

#### **2.1.4. Duplex nehrđajući čelici**

Duplex nehrđajući čelici nemaju monofaznu mikrostrukturu kao prethodno navedene vrste, već se sastoje od austenitnog i feritnog dijela. Feritni dio varira od 40% do 60%. Na slici 7 je prikaz mikrostrukture duplex nehrđajućeg čelika koja se sastoji od feritnog i austenitnog dijela.



**Slika 7:** Mikrostruktura duplex čelika – podjednaki udjeli ferita i austenita [14].

Na taj način se odstupilo od nužnog uvjeta postojanosti na opću koroziju (monofazna struktura), ali je zato povećana postojanost na napetosnu koroziju u kloridnom okruženju kao i na rupičastu koroziju [15].

Duplex čelici imaju široku primjenu u gotovo svim granama industrije (nafta i plin, petrokemija, kemijska i procesna, industrija papira itd.) [9].

### 2.1.5. Korozijski postojani precipitacijski očvrtnuti čelici

Korozijski postojani precipitacijski očvrtnuti čelici su čelici visoke granice razvlačenja i čvrstoće, dobre duktilnosti te istovremeno visoke korozijske postojanosti. Nazivaju se još **PH** čelicima (eng. **P**recipitation **H**ardenable) te se dijele na tri skupine [15]:

- martenzitni PH čelici
- poluaustenitni PH čelici
- austenitni PH čelici.

Tablica 3 prikazuje sastav pojedinog tipa precipitacijski očvrtnutog čelika s najvažnijim legirnim elementima. Da bi se postigla visoka granica razvlačenja i vlačna čvrstoća te čelike treba rastopno žariti pri  $\approx 1050^{\circ}\text{C}$ , gasiti u ulju ili na zraku te umjetno dozrijevati na  $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$ .

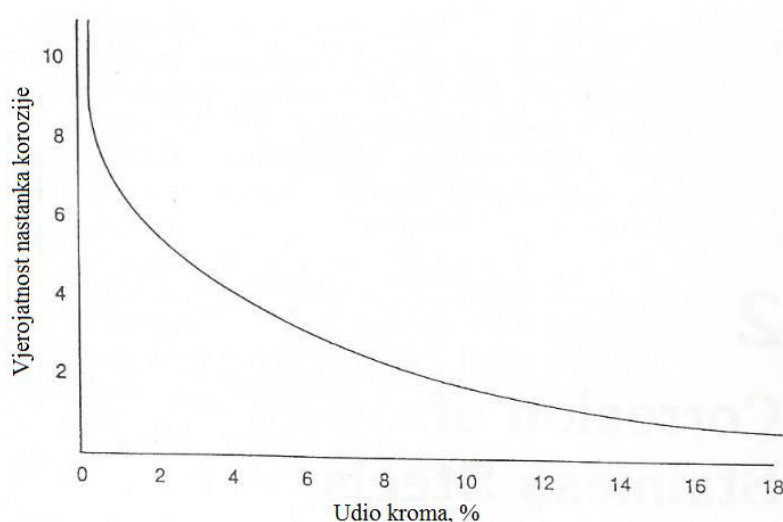
**Tablica 3:** Sastav precipitacijski očvrtnutih čelika [16].

	C [%]	Cr [%]	Ni [%]	Ostalo [%]
<b>Martenzitni</b>	$\approx 0,05$	14-17	4-6	Nb, Cu, Mo, Al
<b>Poluaustenitni</b>	0,05-0,15	13-18	4-9	Mo, Ti, Al, V, N
<b>Austenitni</b>	$\leq 0,10$	14-18	$\geq 25$	Mo, Ti, Cu, Al, Nb, P, V, Mn, Si, N

Zbog svoje visoke čvrstoće najveći udio primjene precipitacijski očvrtnutih čelika je u zrakoplovnoj i ostalim visokotehnološkim industrijama [9].

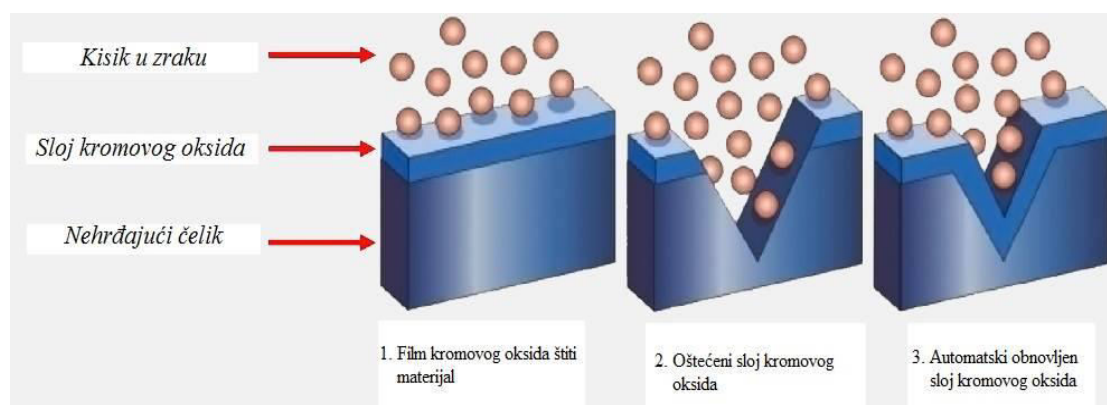
## 2.2. Korozijska postojanost nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici su skupina materijala koji svoju korozijsku postojanost temelje na nastanku pasivnog filma kromovih oksida koji spontano nastaje ako u čeliku ima više od 11 % Cr. Prikaz utjecaja udjela kroma na korozijsku otpornost prikazano je slikom 8.



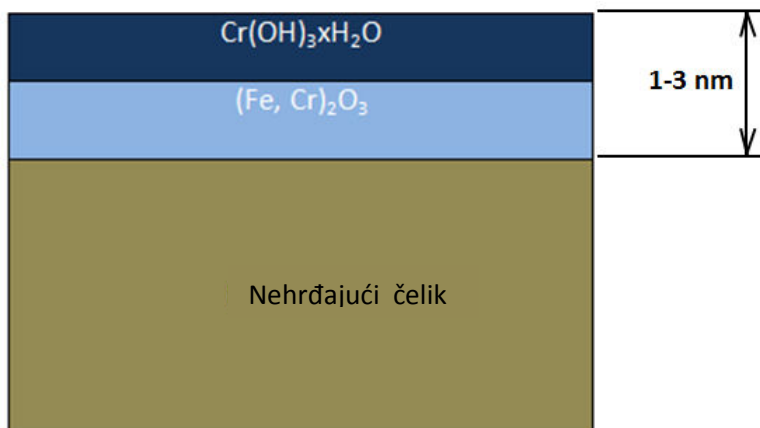
**Slika 8:** Povećanje otpornosti na koroziju s povećanjem udjela kroma [17].

Ugljik je potrebno dovesti na zadovoljavajući niski postotak pa je tako 1% ugljika samo u određenim martenzitnim nehrđajućim čelicima, dok je kod ostalih vrsta čelika taj udio znatno niži. Udio kroma varira u velikom intervalu za određene vrste. Neki nehrđajući čelici imaju čak preko 30% kroma, a neki čak i manje od 50% željeza. Svoju korozijsku postojanost ostvaruju formiranjem nevidljivog površinskog pasivnog filma kromovih oksida koji se u prisustvu kisika samoobnavlja. Na slici 9 prikazan je sloj kromovog oksida koji se obnavlja istog trenu kada bude oštećen uslijed obrađivanja ili eventualnih eksploatacijskih oštećenja, npr. kod habanja ili trošenja [9].



**Slika 9:** Prikaz pasivacije oštećenog sloja [18].

Debljina zaštitnog pasivnog filma je vrlo mala i iznosi svega nekoliko nanometara, ali je još uvijek dovoljno jaka barijera koja je zaslužna za korozijsku postojanost ove vrste materijala. Na slici 10 je prikazana debljina i sastav pasivnog filma na površini nehrđajućeg čelika.



**Slika 10:** Debljina i sastav pasivnog sloja [8].

Pored kroma postojanost prema koroziji povećava se dodatkom nikla. Kombinacijom legiranja kromom i niklom razvijeni su čelici tipa 18/8 (18% Cr i 8% Ni) s austenitnom mikrostrukturom koji su otporni na djelovanje kiselina. Legiranje molibdenom omogućava lakše pasiviziranje te poboljšava korozijsku postojanost i otpornost na jamičastu koroziju Cr-Ni čelika [9].

Neki drugi elementi kao npr. bakar, titan, aluminij, silicij, niobij, dušik, sumpor i selen dodaju se u svrhu poboljšanja pojedinih mehaničkih svojstava [9].

Korozijska postojanost nehrđajućih čelika značajno ovisi o legirnim elementima. Uzimajući to u obzir te kako je ranije navedeno da se postojanost temelji na spontanom formiranju pasivnog filma, očigledno je da je poboljšanje svojstava korozijske otpornosti povezano s djelovanjem pojedinih legirnih elemenata na stabilnost samog pasivnog filma. To značenje utjecaja pojedinih legirnih elemenata može se vidjeti i iz izraza za izračunavanje vrijednosti djelotvorne sume koja opisuje otpornost na rupičastu koroziju – tzv. ekvivalenta otpornosti pitingu – PRE (eng. Pitting Resistance Equivalent) koji se računa prema [8, 9]:

$$\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3(\% \text{Mo} + 0,5\% \text{W}) + x(\% \text{N})$$

pri čemu je  $x = 30$  za austenitne čelike, a  $x = 16$  za austenitno – feritne (duplex) čelike.

Kako se ovi čelici trajno pasiviraju u mnogim sredinama, što je uvjetovano visokim sadržajem kroma, tako se i redovito depasiviraju u kloridnoj kiselini, u sulfatnoj kiselini srednjih koncentracija, osobito pri povišenim temperaturama te u reduktivnim elektrolitima. Depasivacija (aktivacija) u spomenutim sredinama obično je potpuna pa izaziva bržu ili sporiju opću koroziju [8, 9].

Pasivno stanje koje jamči korozijsku otpornost, može se pod određenim uvjetima razoriti što ima za posljedicu pojavu korozijskih procesa, najčešće u obliku usko lokaliziranih korozijskih fenomena [8, 9].

Zavareni spojevi kod nehrđajućih čelika mogu na konstrukciji predstavljati vrlo ozbiljnu opasnost zbog mogućih korozijskih oštećenja jer su to lokaliteti sa izraženim strukturnim i površinskim nehomogenostima i kao takvi predstavljaju "idealno" mjesto za pokretanje korozijskih procesa i to u najčešće onih lokalnih [8, 9].

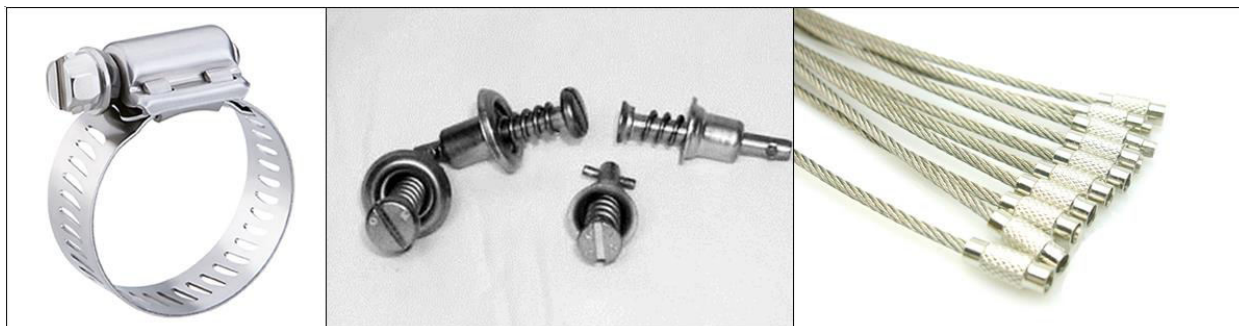
### **2.3. Nehrđajući čelici u zrakoplovnim konstrukcijama**

Danas je jedan od glavnih zahtjeva na zrakoplovnu konstrukciju mala masa zrakoplova. Uz neizbježni teret, putnike i gorivo, ukupna masa letjelice može se učinkovito reducirati najčešće isključivo na samoj konstrukciji. Vrlo bitan zahtjev na materijal je i njegova visoka čvrstoća. Konstrukcija mora biti čvrsta, izdržljiva te imati zadovoljavajući operativni vijek. Uz toliko korištene aluminijske legure, legure titana i kompozite, udio čelika po udjelu u masi još uvijek je značajan. Za usporedbu, novi *Boeing 787 – Dreamliner* koji se ističe po novim tehnologijama te novim materijalima koji su primjenjeni u njegovoj konstrukciji, je prvi komercijalni zrakoplov kod kojeg je 50% dijelova načinjeno od lakih i čvrstih kompozitnih materijala, a oko 10% od čelika [11].

Nehrđajući visokolegirani čelici se primjenjuju na pojedinim korozijski osjetljivim i opterećenim dijelovima zrakoplovne konstrukcije. Osim već spomenutih komponenti hidrauličkih i pneumatskih sustava, koriste se i za mehanizam upravljanja kontrolnim površinama (npr. različiti kablovi). Koriste se ponekad i kao pojedine komponente trupa aviona i mlaznog motora, za uljne cijevi u motoru, komponente podvozja, dijelova za ubrizgavanje goriva i dijelova ispušnog sustava [9].

Tablice 4 i 5 prikazuju neke od komponenti zrakoplova napravljenih od nehrđajućih čelika.

**Tablica 4:** Prikaz primjene nehrđajućih čelika u zrakoplovstvu [19], [20], [21].



**Tablica 5:** Primjena nehrđajućih čelika u zrakoplovima [22].

Primjena	Vrsta nehrđajućeg čelika	
Spremnici	Austenitni	AISI 304 AISI 304L
Ispušni sustav, visokotemperaturni dijelovi motora i konstrukcijski dijelovi	Austenitni	AISI 321 AISI 316 AISI 316L AISI 310
Ostali konstrukcijski dijelovi (povišene temperature)	Austenitni	AISI 304 AISI 304L
	Feritni	AISI 430

### 3. VRSTE KOROZIJSKIH POJAVA KOD NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Postojanost nehrđajućih čelika na opću koroziju ne isključuje mogućnost pojave lokalne korozije koja je neugodnija jer nastupa u unutrašnjosti presjeka ili samo na određenom dijelu površine pa često nije lako vidljiva što dodatno otežava njeno otkrivanje kao i pravovremeno učinkovito sprječavanje [6].

Postoji više vrsta lokalnih oblika korozije koje se mogu pojaviti na nehrđajućim visokolegiranim čelicima. To su [23]:

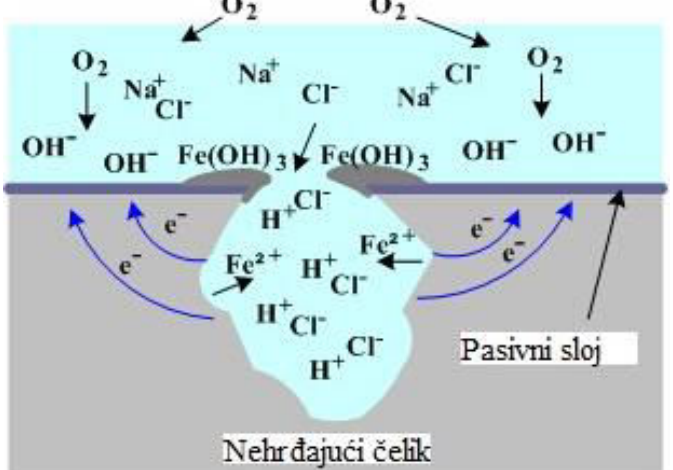
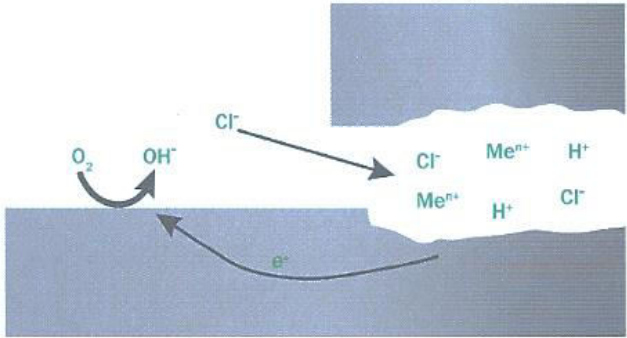
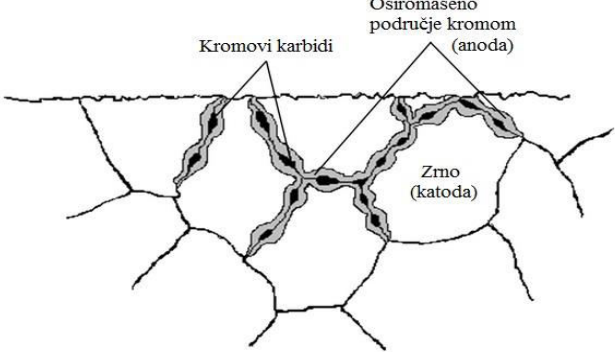
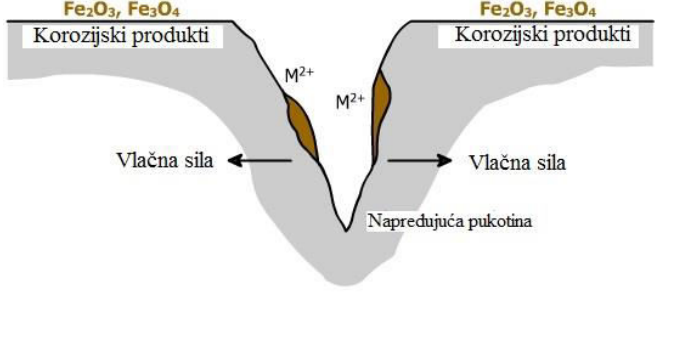
- korozijski umor
- rupičasta („pitting“) korozija
- korozija u procjepu
- interkristalna korozija
- napetosna korozija.

Korozijski umor se javlja za vrijeme cikličkog opterećenja materijala ako je taj dio istovremeno izložen korozivnom okruženju (agresivnom mediju). Agresivno okruženje može nastati snižavanjem pH vrijednosti, npr. lokalno unutar procjepa ili već formirane korozijske jamice. Uspoređujući atmosfersko okruženje bez i s kloridima, okoliš s kloridima će značajno smanjiti izdržljivost na umor određenom nehrđajućem čeliku. U materijalu u takvim uvjetima može doći do puknuća i kod manjeg broja ciklusa. Duplex čelici su zbog toga veće otpornosti na tu vrstu korozije od konvencionalnih austenitnih čelika [24].

Tablica 6 prikazuje različite vrste lokalne korozije s kojima se najčešće „bore“ nehrđajući čelik.



**Tablica 6:** Vrste korozijskih pojava [15, 24, 25, 26, 27].

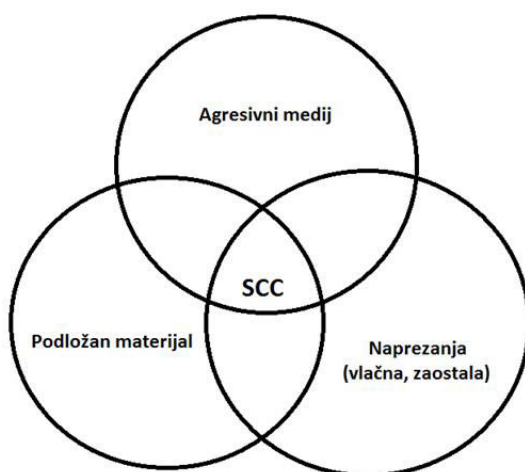
	<p><b><u>Rupičasta korozija</u></b></p> <p>Javlja se na lokalitetima gdje je pasivni sloj iz nekog razloga tanji, na mjestima gdje dolazi do nehomogenosti u strukturi, do razlike u kemijskom sastavu, tj. na lokalno depasiviranim lokalitetima. Najopasniji su pri tom kloridni ioni koji dovode do depasivacije, tj. napadaju materijal pri čemu nastaju male rupice, tj. jamice koje se šire u dubinu materijala. Rupice se nalaze ispod površine i prekrivene su često s produktima korozije pa su nerijetko nevidljive sve dok ne izazovu potpunu perforaciju stijenki.</p>
	<p><b><u>Korozija u procjepu</u></b></p> <p>Korozija u procjepu je najintenzivnija u okolini kloridnih otopina (npr. morska voda, morska atmosfera). Nastaje ako između dva materijala postoji dovoljno mjesta da uđe elektrolit, a još uvijek premalo mjesta da bi se taj elektrolit izmijenio s okolinom što dovodi do osiromašenja kisikom područja unutar procjepa i gomilanja agresivnih kloridnih iona unutar njega. U tom slučaju su ispunjeni uvjeti za nastajanje korozije u procjepu. To se događa npr. kod vijčanih spojeva i spojeva zakovicama, preklopnih spojeva i sl.</p>
	<p><b><u>Interkristalna korozija</u></b></p> <p>Opasan oblik korozije zbog teškog uočavanja. Napreduje po granicama zrna metala što izaziva pucanje metalnih veza između zrna te naposljetku razaranje cijelog dijela. Ovom tipu korozije su podložni i nehrđajući čelici kao što su austenitni Cr-Ni čelici i feritni Cr čelici. Posljedice ove vrste korozije mogu biti izrazito opasne jer materijal naglo postaje krhak. Suvremeni nehrđajući čelici manje su osjetljivi jer imaju vrlo niske udjele ugljika (&lt;0,03%).</p>
	<p><b><u>Napetosna korozija</u></b></p> <p>Napetosna korozija nastupa lokalno na dijelu koji je mehanički vlačno opterećen i okružen agresivnim medijem, najčešće kloridnim. Napetosna korozija nastupa osim na djelovima koji su vlačno opterećeni narinutim naprezanjima i na onima gdje su prisutna zaostala naprezanja nastala kao posljedica proizvodnje konstrukcije. Pukotine se šire interkristalno ili transkristalno.</p>

## 4. NAPETOSNA KOROZIJA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

### 4.1. Mehanizam napetosne korozije na nehrđajućim čelicima

Naprezanja koja dovode do pojave napetosne korozije (eng. Stress Corrosion Cracking - SCC) redovito su mala, uobičajeno ispod granice razvlačenja. Po svojoj prirodi su vlačna i statična, a mogu biti bilo narinuta izvana ili pak posljedica unutrašnjih zaostalih napetosti [9].

Za nastanak napetosne korozije potrebno je istovremeno ostvariti tri uvjeta kao što je prikazno na slici 11.



**Slika 11:** Skica potrebnih uvjeta za nastanak napetosne korozije; SCC (eng. Stress Corrosion Cracking) – napetosna korozija [28].

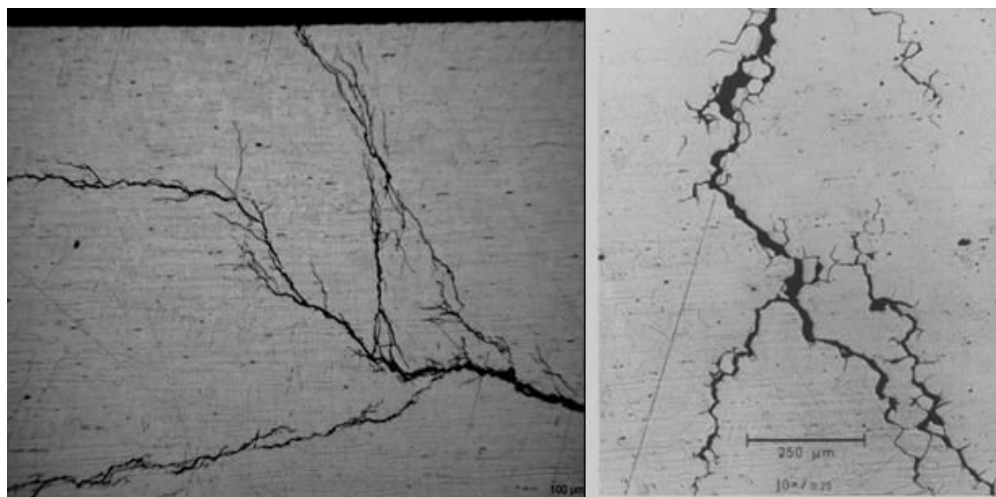
Napetosna korozija neće nastupiti ako je samo jedan od ta tri uvjeta eliminiran [24]. Od nehrđajućih čelika osjetljivi su austenitni i martenzitni čelici. Feritni i duplex čelici su otporni na napetosnu koroziju [15].

Tablica 7 prikazuje da je za pojavu napetosne korozije nehrđajućih čelika potrebno ostvariti okruženje kloridnom otopinom. Vjerojatnost nastanka napetosne korozije kod nehrđajućih čelika raste s povećanjem koncentracije kloridne otopine samog okruženja, povećanjem temperature i sniženjem pH vrijednosti okruženja [24].

**Tablica 7:** Korozivna okruženja za nastanak napetosne korozije pojedinih materijala [29].

<u>Legura</u>	<u>Okruženje</u>
<i>Ugljični čelik</i>	Amonijak, HCN, amonijev nitrat, natrijev nitrit, natrijev hidroksid
<i>Aluminijska legura</i>	Zrak, morska voda i kemijska kombinacija zraka i vode
<i>Magnezijska legura</i>	Dušična kiselina, fluorovodična kiselina, soli, obalna atmosfera
<i>Legura bakra</i>	Amonijak, amonijev hidroksid, amini, živa
<i>Martenzitni i precipitacijski očvršnuti čelici</i>	Morska voda, kloridi, H <sub>2</sub> S otopine
<i>Austenitni nehrđajući čelici</i>	Kloridi (organski i anorganski), sumporasta kiselina
<i>Legure nikla</i>	Natrijevi spojevi iznad 315°C, fluorovodična kiselina
<i>Titan</i>	Morska voda, slana atmosfera
<i>Cirkonij</i>	FeCl <sub>3</sub> ili CuCl <sub>2</sub> otopine




Za prevenciju od napetosne korozije ne pomaže dodatno legiranje, ali pomaže provođenje odgovarajuće toplinske obrade za eliminaciju zaostalih naprezanja. Proviđa se na temperaturi od 850 – 900°C [15]. Toplinska obrada ponekad ne mora imati pozitivne učinke jer mogu nastati precipitati određenih faza u strukturi koji mogu imati štetnije učinke od samih zaostalih naprezanja. Napetosna korozija uobičajeno stvara tanke i razgranate pukotine (slika 12). Pukotine uzrokovane napetosnom korozijom u okruženju s kloridnom otopinom najčešće se šire transkristalno, odnosno šire se preko kristalnih zrna [24].

**Slika 12:** Razgranata struktura pukotina uslijed napetosne korozije austenitnog nehrđajućeg čelika [30, 31].

Ovisno o okruženju kojem su izloženi, nehrđajući čelici mogu biti podložni napetosnoj koroziji i prilikom malih opterećenja. Zaostala naprezanja od različitih proizvodnih procesa, npr. zaostala naprezanja od zavarivanja, obrade deformiranjem i sl., mogu biti dovoljna da uzrokuju napetosnu koroziju koja može dovesti do puknuća. Također, i konstrukcijska rješenja koja imaju za posljedicu nastanak procjepa u kojem se lokalno nagomilavaju agresivne tvari, što dovodi do nastanka korozijskih jamica, ukoliko je konstrukcija vlačno opterećena, mogu imati za posljedicu iniciranje napetosne korozije [8, 9, 17, 23].

Slučaj lomova upravljačkih kablova na zrakoplovima Piper Aircraft uslijed napetosne korozije prikazan je tablicom 8 i slikom 13. Kako je upravljački mehanizam kontrolnih površina za zrakoplov jedna od nužnih sastavnica za stabilan let, jasno je da njegovo puknuće ima vrlo ozbiljne posljedice.

**Tablica 8:** Prikaz slučaja napetosne korozije dijela upravljačkog mehanizma koji upravlja kontrolnim površinama zrakoplova, čelik AISI 304 [13].

 <p>Korozija na rubu gume</p>	<p>Uočava se korozija u području procjepa na rubu gume koja prekriva dio nehrđajućeg čelika.</p>
<p>Jamičasta korozijska oštećenja nastala u procjepu ispod gume u kojem je agresivnost lokalno bitno veća nego na dijelovima nepokrivenim gumom.</p>	 <p>Rupičasta korozija ispod gume</p>
	<p>Prikaz prelomljenog dijela koji je puknuo uslijed napetosne korozije u kloridnom okruženju.</p>



**Slika 13:** Detaljniji prikaz napetosne korozije kabla za upravljačke površine, čelik AISI 304. Vidljivo je da pukotina još nije potpuno perforirala stijenku materijala [32].

Tablica 9 prikazuje pojedine nehrđajuće čelike koji su bili ispitivani na napetosnu koroziju u različitim okruženjima i uvjetima. Vidljivo je da je najčešće korišteni nehrđajući čelik – onaj oznake AISI 304L (*EN 1.4307*) podlegao napetosnoj koroziji u svim uvjetima ispitivanja.

**Tablica 9:** Prikaz postojanosti nekih nehrđajućih čelika na napetosnu koroziju [24].

Oznaka nehrđajućeg čelika	Vrsta nehrđajućeg čelika	ASTM G 36 45% MgCl 155 °C U-savijanje 24h	40% CaCl <sub>2</sub> 100 °C U-savijanje 500h	40% CaCl <sub>2</sub> 100 °C 0.9xR <sub>p0.2</sub> 500h	ASTM G 230 25% NaCl, pH 1.5 106 °C U-savijanje 1000h	25% NaCl 106 °C U-savijanje 1000h	ASTM C 692 1500ppm Cl <sup>-</sup> 100 °C R <sub>p0.2</sub> 672h
EN 1.4003 / AISI 410L	F			N.T		N.T	
EN 1.4016 / AISI 430	F			N.T		N.T	
EN 1.4509 / AISI 441	F			N.T		N.T	
EN 1.4307 / AISI 304L	A						
EN 1.4521 / AISI 444	F			N.T		N.T	
EN 1.4404 / AISI 316L	A						
EN 1.4539 / UNS N08904	A						
EN 1.4547 / UNS S31254	A						
EN 1.4162 / UNS S32101	D						
EN 1.4362 / UNS S32304	D						
EN 1.4662 / UNS S82441	D						
EN 1.4462 / UNS S32205	D						
EN 1.4410 / UNS S32750	D						

	Nije došlo do pojave napetosne korozije (niti jedan uzorak nije podlegao napetosnoj koroziji)	
	Očekivana je napetosna korozija (svi uzorci su podlegli napetosnoj koroziji)	
	Mogućnost pojave napetosne korozije (nekoliko uzoraka je podleglo napetosnoj koroziji)	

F – feritni      A – austenitni      D – duplex      N.T – nije testirano  
 EN – European Norm      ASTM – American Society for Testing and Materials  
 AISI – American Iron and Steel Institute      UNS – Unified numbering system

Tablica 10 pruža uvid u sklonost nehrđajućeg čelika na napetosnu koroziju u ovisnosti o različitim udjelima silicija. Legiranje silicijem se pokazalo kao vrlo korisna metoda za veću otpornost prema napetosnoj koroziji u realnom kloridnom okruženju. U ispitnoj otopini MgCl<sub>2</sub> se



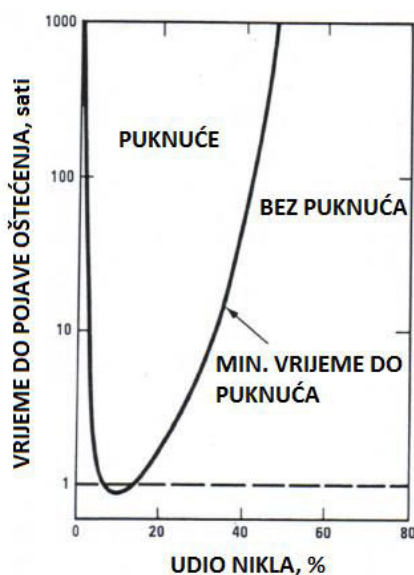
uočava da je legiranje silicijem vrlo učinkovito, dok je iako pozitivan, utjecaj dodatnog legiranja silicijem, manje izražen u otopini NaCl [17].

**Tablica 10:** Otpornost nehrđajućeg čelika na napetosnu koroziju u kloridnom okruženju s obzirom na udio silicija [17].

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	N, %	Udio ferita, %	Vrijeme do puknuća, h		
							42% MgCl <sub>2</sub> u točki vrelišta	100ppm NaCl na 250°C	1000ppm NaCl na 250°C
0,020	0,46	0,83	18,28	15,10	0,07	0,5	219	28	10
0,022	0,80	0,77	18,54	15,20	0,08	0,5	292	24	5
0,031	2,48	0,83	18,58	15,23	0,07	1	1000NP	92	32
0,031	3,69	0,88	18,46	15,20	0,07	1	1000NP	81	15
0,031	4,53	0,86	18,42	15,28	0,08	2,5	1000NP	54	50

1000NP – nema puknuća u 1000h

Slika 14 prikazuje utjecaj udjela nikla u nehrđajućem čeliku prema otpornosti na napetosnu koroziju u kloridnom okruženju ključajuće 42% otopine magnezijevog klorida. Rezultati prikazuju kako je visoki udio nikla (oko 50%) dovoljan za otpornost nad napetosnom korozijom u kloridnom okruženju. U praksi se napetosna korozija u kloridnom okruženju uobičajeno ne nastaje ako je udio nikla preko 42%. Stoga se za primjenu u kloridnom okruženju gdje može doći do pojave napetosne korozije i preporučuju različite legure nikla [17].



**Slika 14:** Vrijeme do pojave puknuća uslijed napetosne korozije u ovisnosti o udjelu nikla [17].

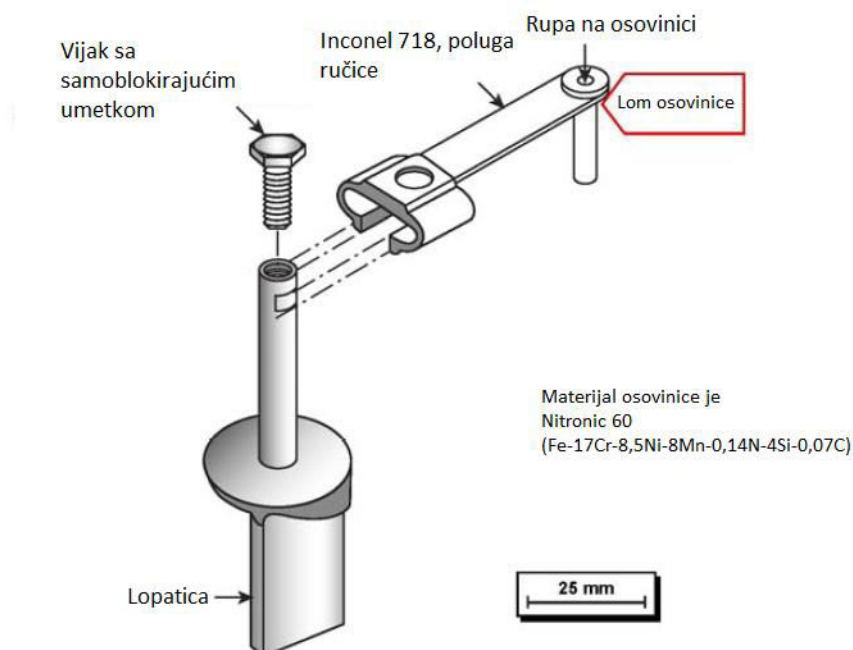
#### 4.2. Prikaz slučaja: pad borbenog zrakoplova F-16 zbog napetosne korozije nehrdajućeg čelika

Zrakoplov F-16 proizvođača General Dynamics srušio se 1992.g. zbog otkaza motora Pratt & Whitney F100-PW-220 pored stambenog bloka u gradu Hengelo u Nizozemskoj. Slika 15 prikazuje tip letjelice i samo mjesto nesreće u kojoj, nasreću, nitko nije stradao.



**Slika 15:** Zrakoplov F-16 (slika lijevo) i mjesto pada (slika desno) [33, 34].

Otkaz motora se dogodio uslijed puknuća osovinice pričvršćene za polugu pokretne lopatice u posljednjem stupnju kompresora kao što prikazuje slika 16.



**Slika 16:** Mehanizam zakreta lopatice i mjesto puknuća osovinice [3].

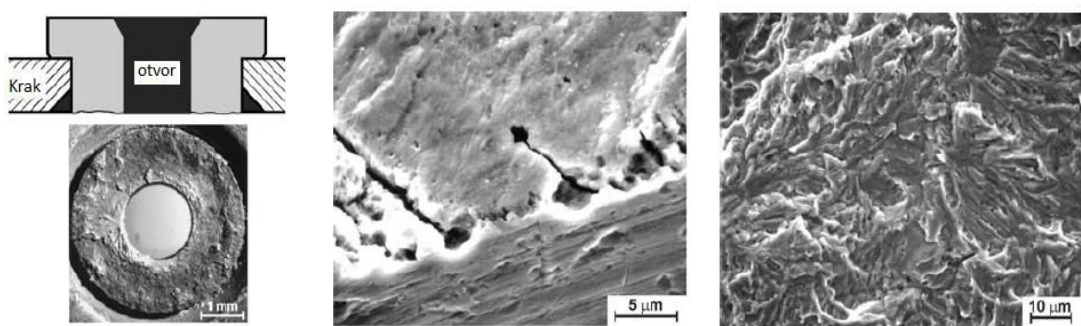
Napetosna korozija je nastala uslijed nakupljanja klorida iz atmosfere za vrijeme mirovanja motora. Kloridi su se nakupljali između osovinice i poluge te su time bili ostvareni svi preduvjeti za nastanak napetosne korozije. Slijed događaja bio je [3]:

- kloridi se talože na polugu tijekom prolaska morskog zraka za vrijeme mirovanja motora
- koncentrirana otopina klorida prodire u procjep između osovinice i poluge – inicijacija korozijskih oštećenja
- napetosna korozija u međuprostoru te naknadni lom osovinice
- poremećaj položaja petog stupnja kompresora
- aerodinamička pobuda šestog stupnja kompresora
- otpadanje lopatice posljednjeg stupnja kompresora zbog loma uslijed umora materijala
- potpuni raspad motora

Uzrok nastanka napetosne korozije [3]:

1. do tada nedovoljno poznata osjetljivost austenitnog nehrđajućeg čelika Nitronic 60 (UNS S21800) na napetosnu koroziju
2. obradom glave osovinice na hladno prilikom montaže u motoru unijeta su velika zaostala naprezanja
3. kombinacija podložnog materijala, zaostalih naprezanja i koncentrirane otopine klorida dovela do neizbježnog slijeda događaja.

Slikom 17 prikazana je površina prijeloma osovinice, jamičasta korozijska oštećenja i nastale transkristalne napetosne pukotine.



**Slika 17:** Površina prijeloma osovinice (slika lijevo), jamičasta korozijska oštećenja (slika u sredini), transkristalne napetosne pukotine (slika desno) [35].

Korišteni nehrđajući čelik je zamijenjen novim materijalom - superlegurom na bazi nikla Inconel 625 (UNS N06625) koja je otporna na napetosnu koroziju u procjepu gdje ima klorida [3].



#### 4.3. Ispitivanje napetosne korozije na nehrđajućim čelicima

Za ispitivanje napetosne korozije nehrđajućih visokolegiranih čelika najčešće se koriste sljedeće norme [9]:

1. ASTM G 58 - 85
2. ASTM G 44 - 94
3. ASTM G 36 - 94
4. ASTM G 123 - 96

##### **ASTM G 58 – 85 : Standardni postupak pripreme zavarenih ispitnih uzoraka za ispitivanje na napetosnu koroziju**

Ispitivanje uključuje izradu ispitnih uzoraka zavarivanjem i njihovo ispitivanje na otpornost napetosnoj koroziji u sljedećim varijantama [9]:

- naprezanja su unesena samo zavarivanjem
- naprezanja su unesena zavarivanjem i vanjskim opterećenjem
- naprezanja su unesena vanjskim opterećenjem i zaostalim naprezanjima uzrokovanih zavarivanjem koji su poništeni žarenjem,

pri čemu oblik uzorka može biti u obliku slova „U“ ili „C“.

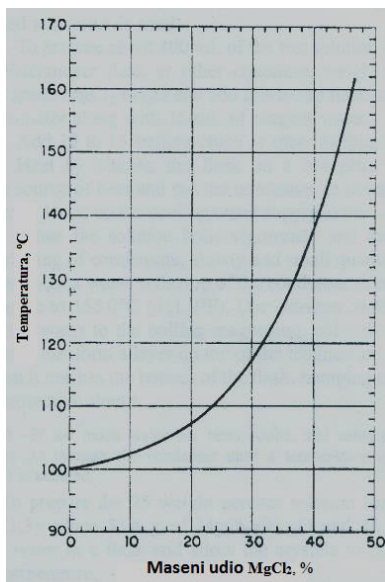
##### **ASTM G 44 – 94: Standardni postupak ispitivanja otpornosti napetosne korozije metala i legura naizmjeničnim uranjanjem u 3,5% otopinu NaCl**

Ispitivanje se provodi naizmjeničnim uranjanjem ispitnih uzoraka u otopinu natrijevog klorida. Uzorak se ispituje jednosatnim ciklusima pri čemu je 10 minuta uronjen u 3,5% otopinu NaCl, a 50 minuta je izvađen iz nje i izložen atmosferskim uvjetima. Ciklus se ponavlja u pravilu više dana, a broj dana ovisi o ispitivanom materijalu. Aluminijske i željezne legure se npr. uobičajeno ispituju u trajanju od 90 dana, a ukoliko su legure otpornije onda i dulje.

##### **ASTM G 36 – 94: Standardni postupak ispitivanja otpornosti napetosne korozije metala i legura u vreloj otopini magnezijevog klorida**

Ispitivanje opisuje proceduru poticanja napetosne korozije u vreloj otopini magnezijevog klorida. Iako ispitivanje može biti provedeno s različitim koncentracijama otopine, ovaj standard

propisuje temperaturu ispitivanja od  $155 \pm 1^\circ\text{C}$ . Na slici 18 prikazana je ovisnost točke vrelišta otopine u odnosu na koncentraciju magnezijevog klorida na atmosferskom tlaku. Vidi se da 45%-tna otopina  $\text{MgCl}_2$  ključa na  $155^\circ\text{C}$ . Za vrijeme ispitivanja (ključanja otopine) potrebno je paziti na konstantnost sastava otopine zbog isparavanja vode što se osigurava korištenjem ispitne aparature koju preporuča navedena norma, a koja se sastoji od odgovarajućeg hladila (ukoliko ispitivanje traje manje od 7 dana) te posebnog dodatka za kompenzaciju otopine ako ispitivanje traje dulje.



**Slika 18:** Ovisnost točke vrelišta o udjelu magnezijevog klorida u vodenoj otopini [9].

Ispitivanje ključajućom otopinom magnezijevog klorida je primjenjivo na sve vrste nehrđajućih čelika, dobra je metoda za detekciju utjecaja kemijskog sastava, toplinske obrade, površinske obrade, mikrostruktura i naprezanja. Ova ispitivanja u pravilu za austenitne nehrđajuće čelike traju manje od 24 h pa se najčešće i koriste.

***ASTM G 123 – 96: Standardna metoda ispitivanja napetosne korozije nehrđajućih čelika s različitim udjelom nikla u vreloj kiseloj otopini natrijevog klorida***

Ispitivanje se izvodi u 25% otopini natrijevog klorida s pH 1,5 koji se postiže dodatkom fosforne kiseline. Ispitni uzorak je u obliku slova „U“, a ispitivanje traje 6 tjedana (oko 1000h). Ukoliko ne dođe do loma ispitivanja mogu biti i dulja i ona dokazuju vrlo visoku otpornost na SCC.

## **5. EKSPERIMENTALNI DIO**

### **5.1. Uvod**

U eksperimentalnom dijelu provedeno je ispitivanje nehrđajućih čelika na napetosnu koroziju. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Eksperimentalni dio proveden je kroz sljedeće faze:

- priprema uzoraka
- korozijsko ispitivanje uzoraka
- analiza rezultata.

U eksperimentalnom dijelu korištene su tri vrste nehrđajućih čelika i to:

- austenitni nehrđajući čelik oznake AISI 304 L
- austenitni nehrđajući čelik oznake AISI 316 L
- feritni nehrđajući čelik oznake AISI 430.

koje su bili podvrgnute ispitivanju otpornosti na napetosnu koroziju prema normi AISI G 36 - 94.

### **5.2. Priprema uzoraka**

Prije izrade ispitnih uzoraka provjeren je kemijski sastav materijala – limova iz kojih su izrezani pojedini ispitni uzorci na potrebne dimenzije. Kvantitativna kemijska analiza uzoraka provedena je nerazornom metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF) na uređaju XRF-Olympus, proizvođač: Innov-X Systems, Inc., model: DS 2000-C, slika 19. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 11.

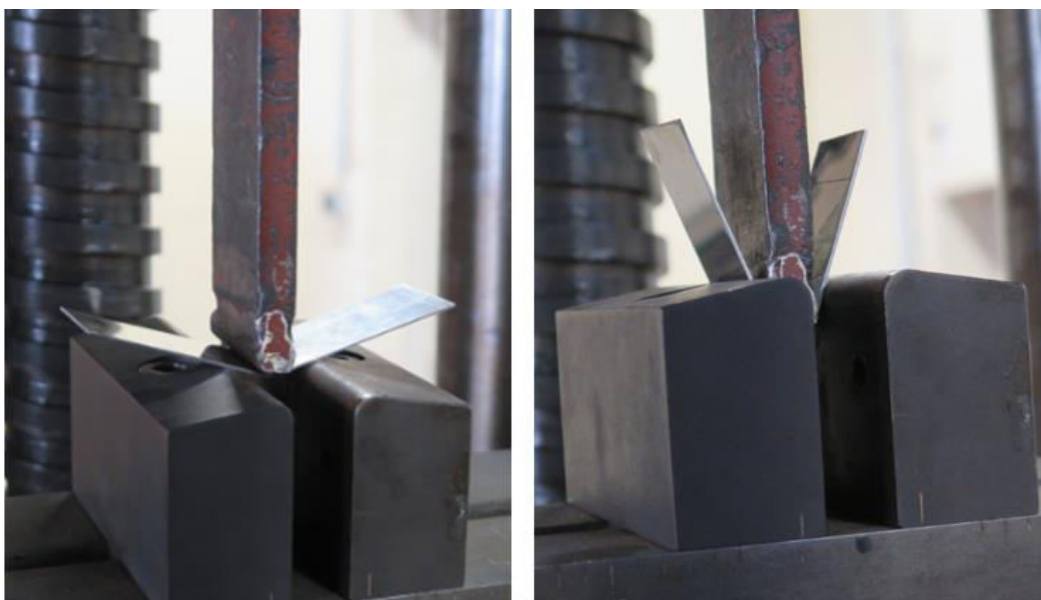
Nakon provjere kemijskog sastava izrezani su ispitni uzorci dimenzija 100×30×1 mm koji su potom u Laboratoriju za mehanička ispitivanja FSB-a savinuti u obliku slova „U“ korištenjem trna promjera 9,5 mm kako to propisuje norma, slika 20.



**Slika 19:** Prikaz provedbe ispitivanja kemijskog sastava XRF metodom.

**Tablica 11:** Kemijski sastav ispitnih uzoraka.

Nehrdajući čelik	Fe, %	Ni, %	Cr, %	Mn, %	Si, %	Cu, %	V, %	Mo, %
AISI 304 L	70,78	9,12	18,15	1,13	0,3	0,2	0,13	0,188
AISI 316 L	68,8	10,32	16,76	1,06	0,59	0,36	0,13	1,99
AISI 430	83,14	0,17	16,06	0,31	0,32	-	-	-



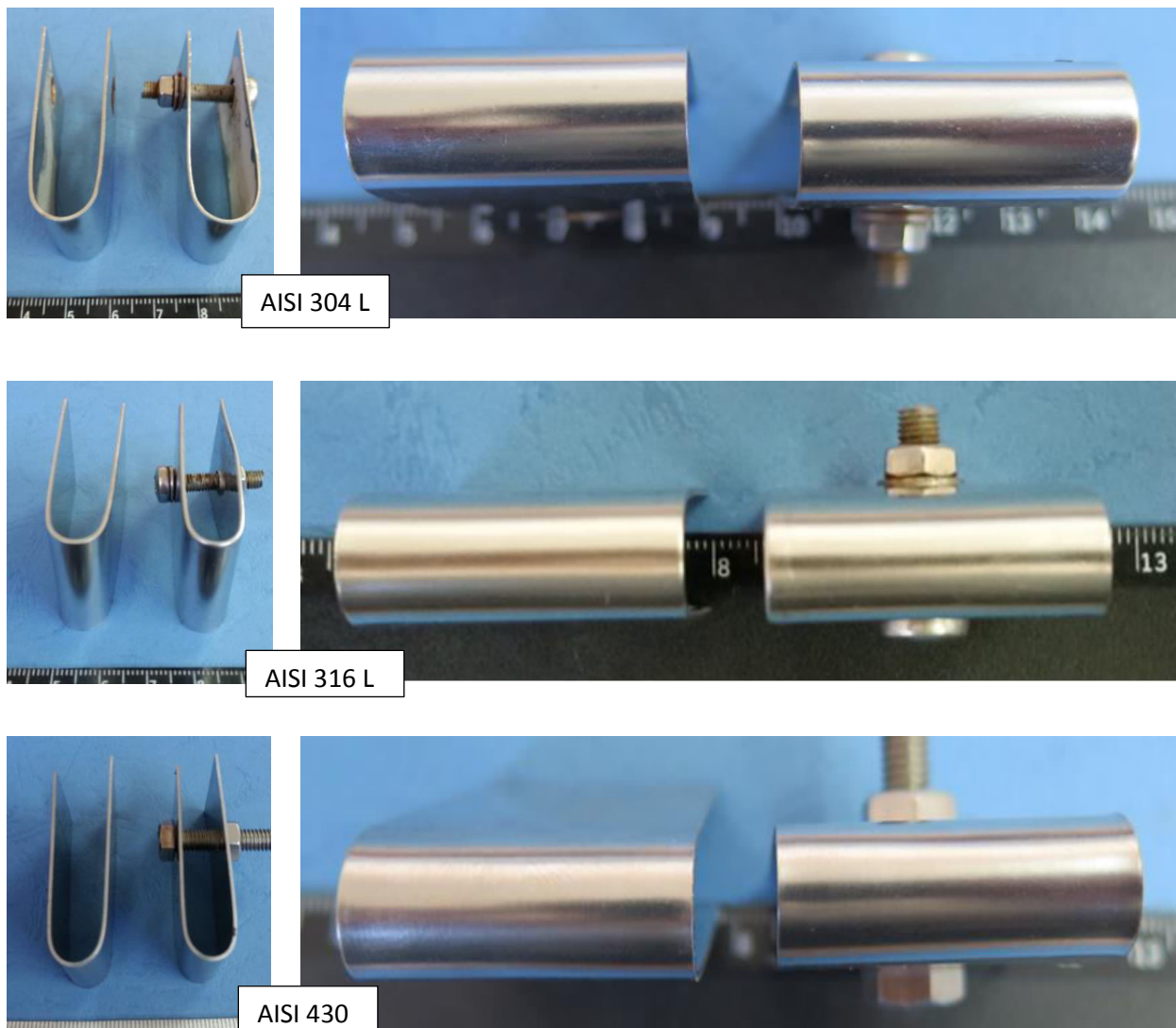
**Slika 20:** Početna faza savijanja (slika lijevo) i gotovo potpuno savinuti uzorak (slika desno).

Ispitivanja su provedena na po dva ispitna uzorka od svake vrste korištenih nehrđajućih čelika pri čemu se, osim utjecaja vrste čelika, istraživao i utjecaj vrste naprezanja na pojavu napetosne korozije i to:

- zaostalih naprezanja
- zaostalih i narinutih naprezanja.

Zaostala naprezanja su nastala kao posljedica deformiranja ispitnih uzoraka savijanjem, dok su pritezanjem vijkom unesena narinuta naprezanja. Za pritezanje ispitnih uzoraka korišteni su vijci i matice od nehrđajućeg čelika.

Na slici 21 prikazani su pripremljeni ispitni uzorci prije provedbe ispitivanja.



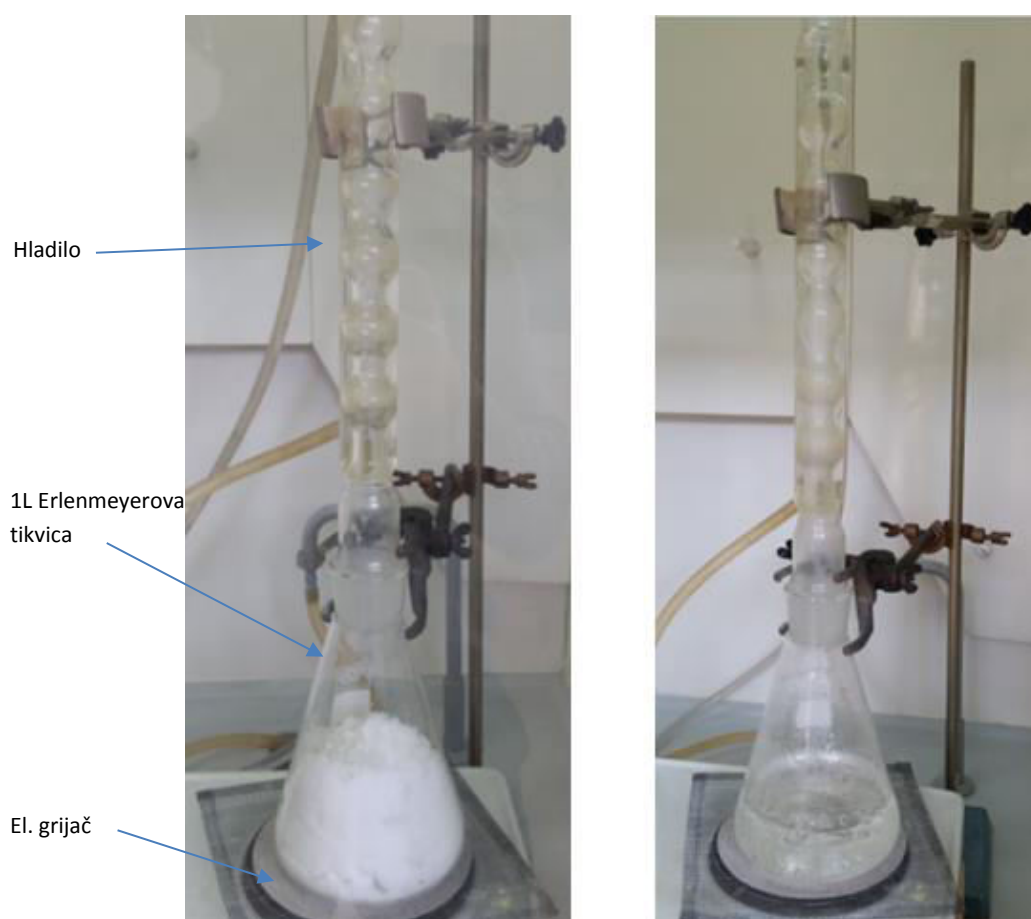
**Slika 21:** Prikaz uzoraka prije provedbe ispitivanja.

### 5.3. Korozijsko ispitivanje otpornosti na napetosnu koroziju prema ASTM G36 - 94

Korozijsko ispitivanje otpornosti ispitnih uzoraka na sklonost napetosnoj koroziji provedeno je prema zahtjevima norme ASTM G 36 – 94 u ključajućoj 45 % otopini  $\text{MgCl}_2$  u trajanju od 20 h.

Prikaz provedbe korozijskog ispitivanja, kao i korištena aparatura dan je slikom 22.

Ispitna otopina magnezijevog klorida pripremljena je zagrijavanjem  $600 \text{ g } \text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$  uz dodatak 15 mL destilirane vode.



**Slika 22:** Prikaz provedbe korozijskog ispitivanja i korištene aparature. Zagrijavanjem hidratizirane soli  $\text{MgCl}_2$  (lijevo) na  $155^\circ\text{C}$  dobivena je ispitna otopina (desno).

Ispitni uzorci uronjeni su u ključajuću otopinu kada je postignuta temperatura od  $155^\circ\text{C}$ . Pri tom, ispitivanje je, s obzirom na različite vrste ispitivanih čelika (austenitni, feritni) provedeno u dvije

odvojene faze od po 20 h, tako da su prvo bili izlagani uzorci austenitnih čelika (AISI 304 L i AISI 316 L), a potom odvojeno uzorci feritnog čelika (AISI 430).

Slika 23 prikazuje detalj snimljen tijekom provedbe korozijskog ispitivanja izlaganjem uzoraka ključajućoj otopini magnezijevog klorida.



**Slika 23:** Detaljniji prikaz provedbe korozijskog ispitivanja. Snimljeno tijekom ispitivanja uzoraka od austenitnih čelika.

Nakon provedenog ispitivanja uzorci su izvađeni iz otopine, isprani te osušeni.

#### **5.4. Vizualni pregled, stereomikroskopska ispitivanja, ispitivanja skenirajućim elektronskim mikroskopom**

Ispitni uzorci nakon provedbe korozijskog ispitivanja vizualno su pregledani te su na njima provedena stereomikroskopska ispitivanja korištenjem stereomikroskopa Leica MZ6, slika 24. U karakterističnim područjima nastalih korozijskih oštećenja provedena su i dodatna ispitivanja skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) na pojedinim ispitnim uzorcima. Ova ispitivanja provedena su u Laboratoriju za materijalografiju FSB na elektronskom mikroskopu Tescan, slika 25.





**Slika 24:** Stereomikroskop Leica MZ6 – Laboratorij za zaštitu materijala FSB-a.

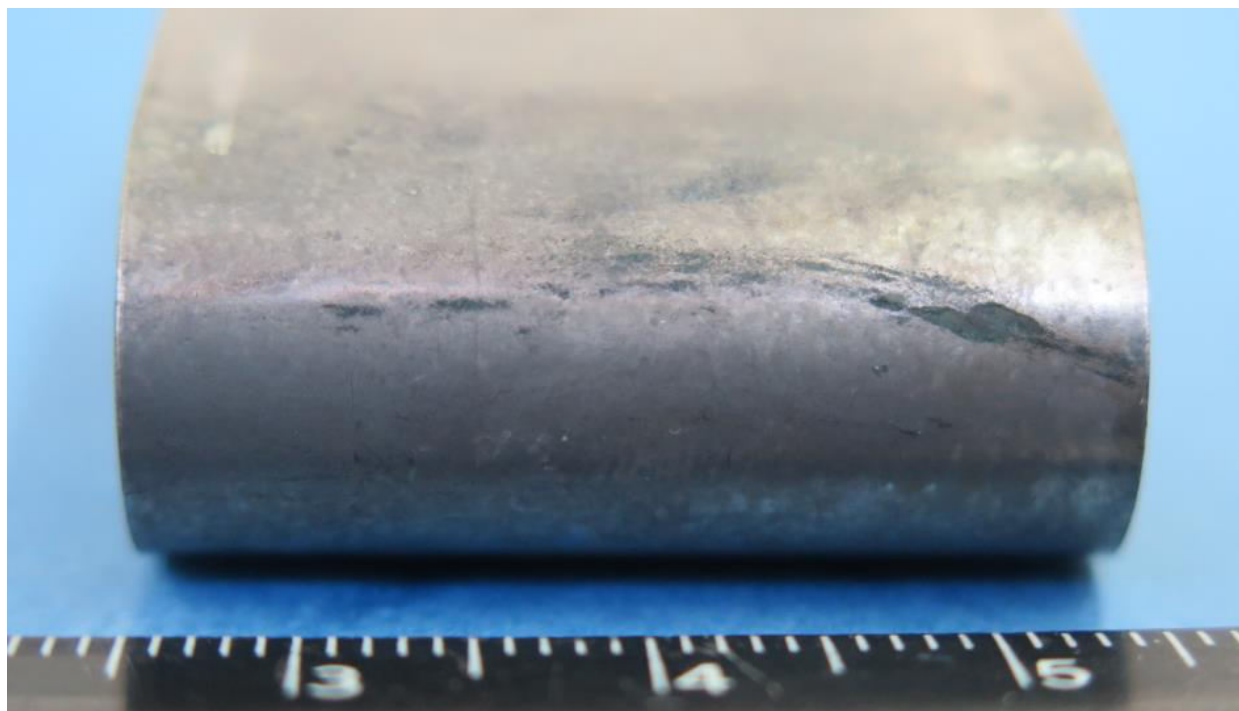


**Slika 25:** Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) – Laboratorij za materijalografiju FSB-a.

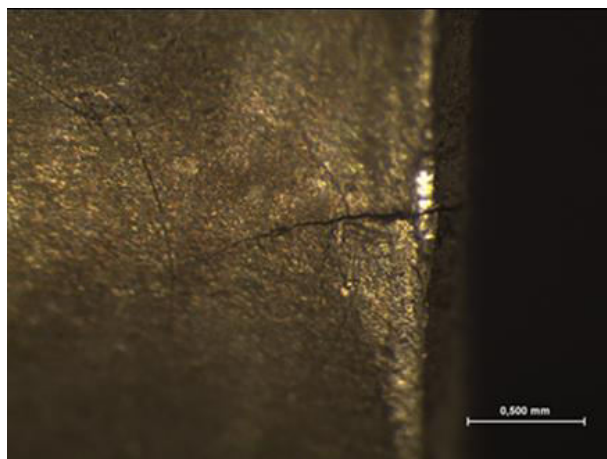
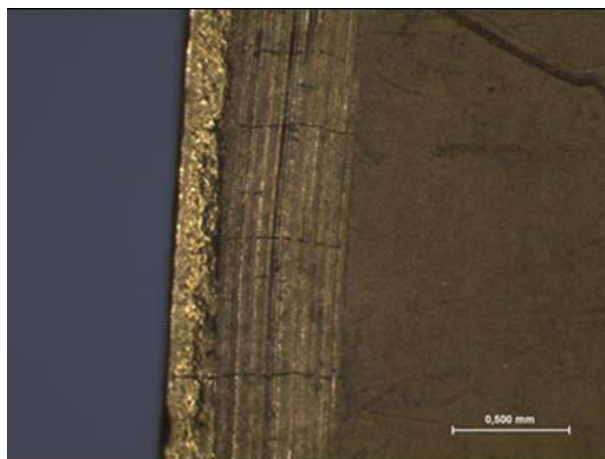
Rezultati provedenih vizualnih pregleda i stereomikroskopskih ispitivanja zbirno su prikazani za svaki ispitni uzorak na slikama 26 do 31.

Karakteristični detalji snimljeni skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM snimke) prikazani su na slikama 32 do 34.



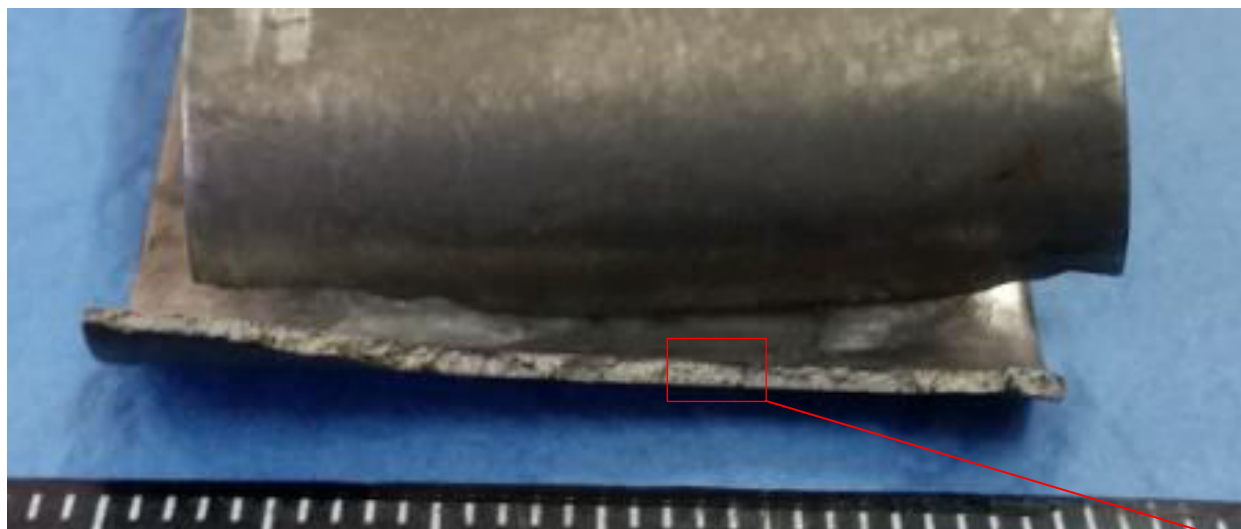
**AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELIK AISI 304 L****VRSTA NAPREZANJA: ZAOSTALA**

**Vizualni pregled:** Ne uočavaju se pukotine na ispitnoj površini.

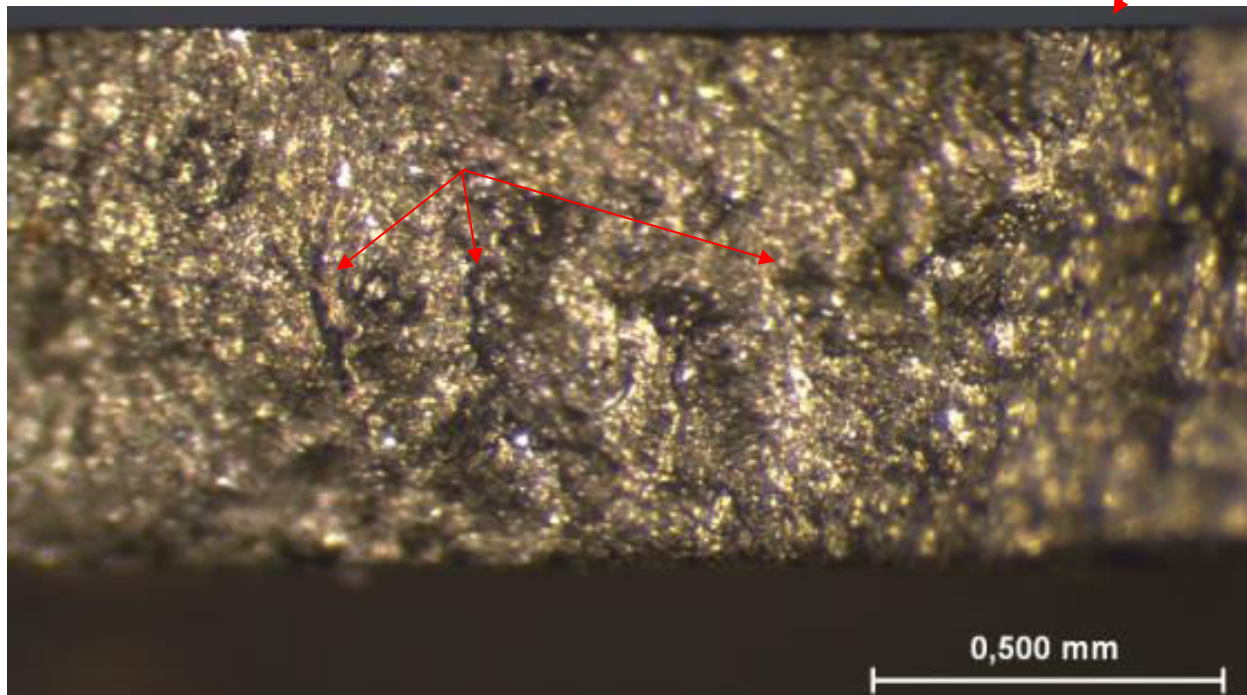


**Stereomikroskopska ispitivanja:** Vidljivo je iniciranje pukotina uslijed napetosne korozije u rubnim područjima ispitnog uzorka.

**Slika 26:** Prikaz rezultata – čelik AISI 304 L sa zaostalim naprezanjima.

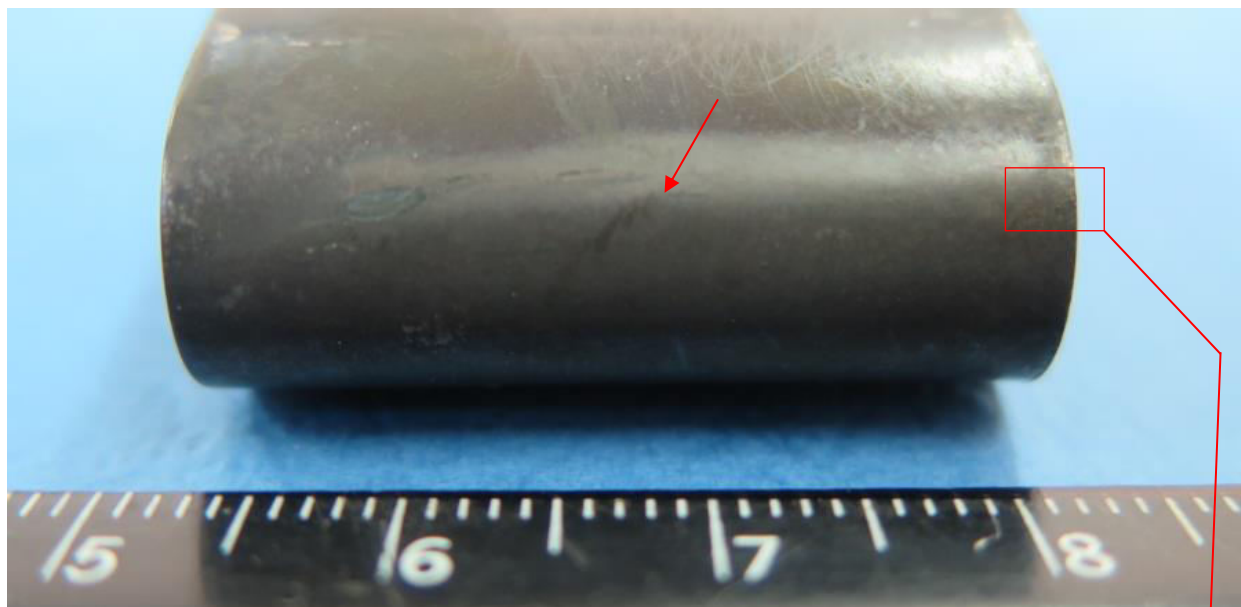
**AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELIK AISI 304 L****VRSTA NAPREZANJA: ZAOSTALA I NARINUTA**

**Vizualni pregled:** Intenzivna pojava napetosne korozije - nastala pukotina dovela je do potpunog loma ispitnog uzorka.

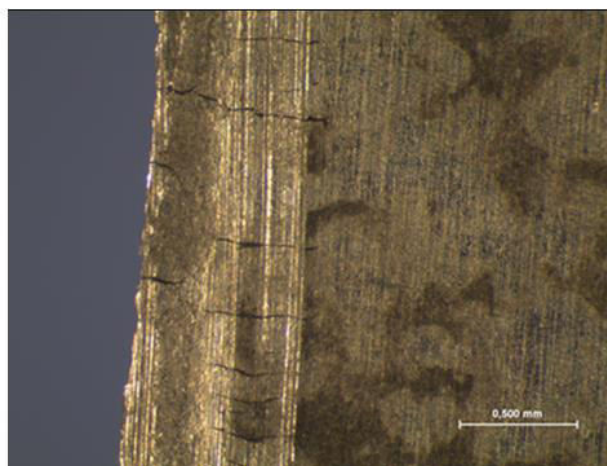


**Stereomikroskopska ispitivanja:** Prijelomna površina – krhki lom materijala s vidljivim pukotinama nastalim napetosnom korozijom (označeno strelicama).

**Slika 27:** Prikaz rezultata – čelik AISI 304 L sa zaostalim i narinutim naprezanjima.

**AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELIK AISI 316 L****VRSTA NAPREZANJA: ZAOSTALA**

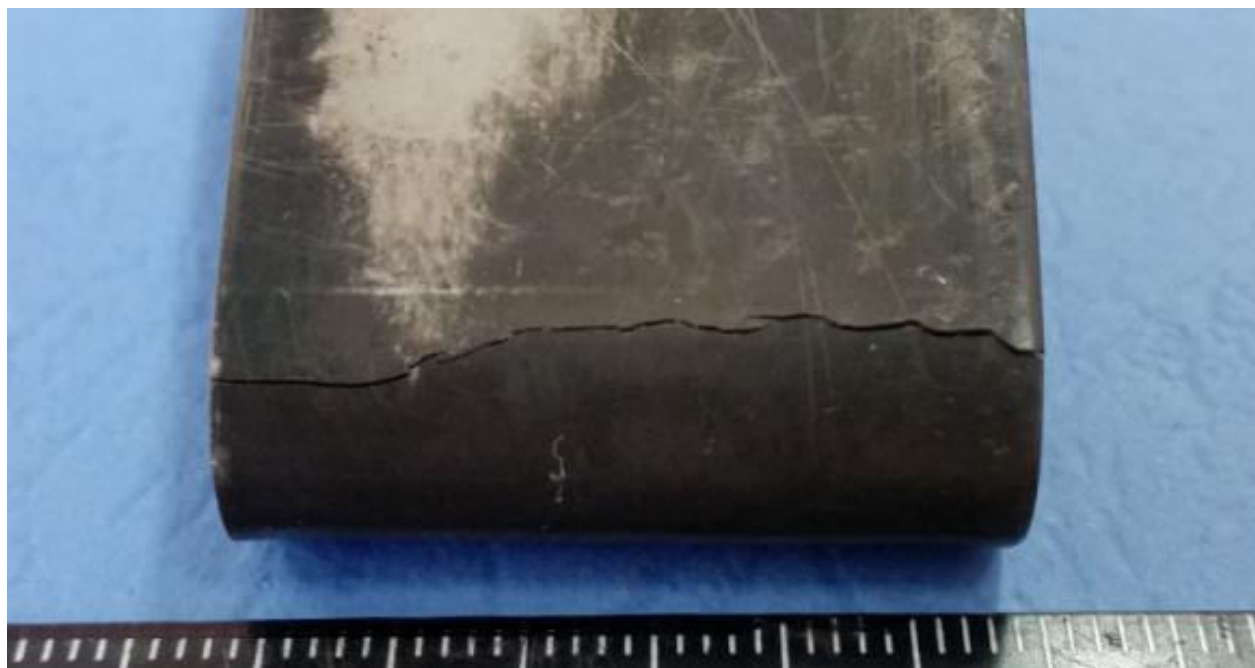
**Vizualni pregled:** Uočljiva inicijacija napetosne korozije u rubnim područjima te nastanka rupičastih korozijskih oštećenja (označeno strelicom).



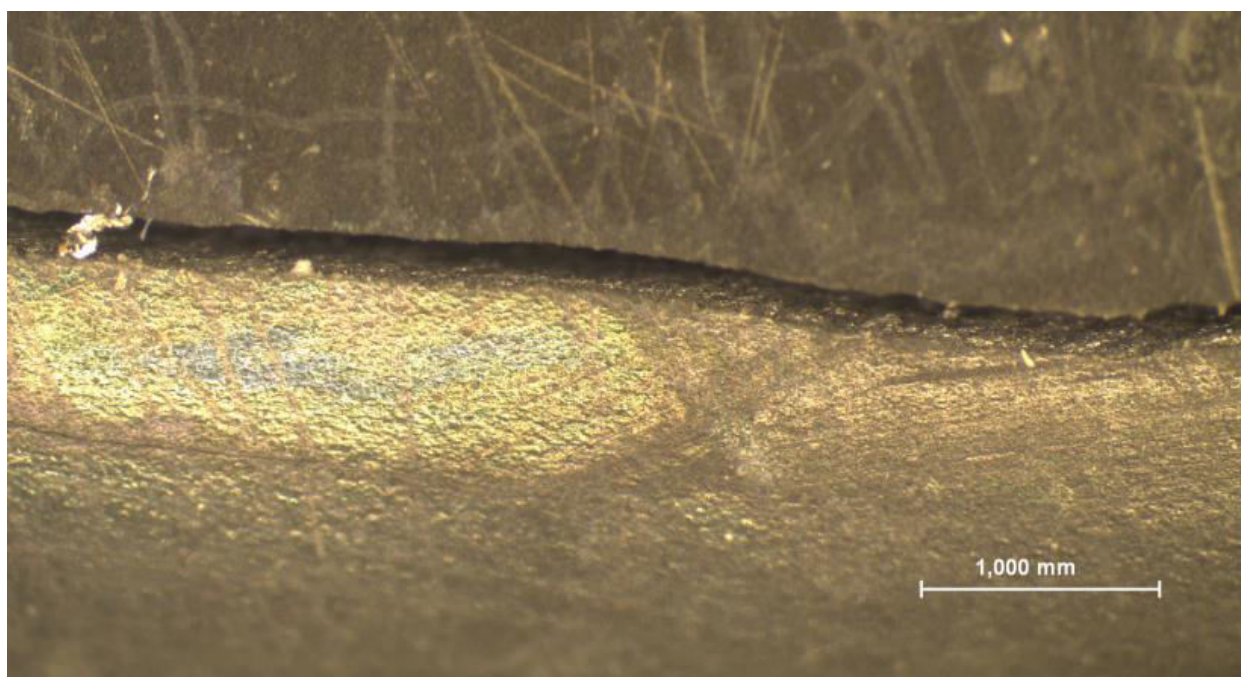
**Stereomikroskopska ispitivanja:** Pojava rupičaste korozije na čelu uzorka (slika lijevo), niz paralelnih pukotina uzrokovanih napetosnom korozijom u rubnom području (slika desno).

**Slika 28:** Prikaz rezultata – čelik AISI 316 L sa zaostalim napreznjima.



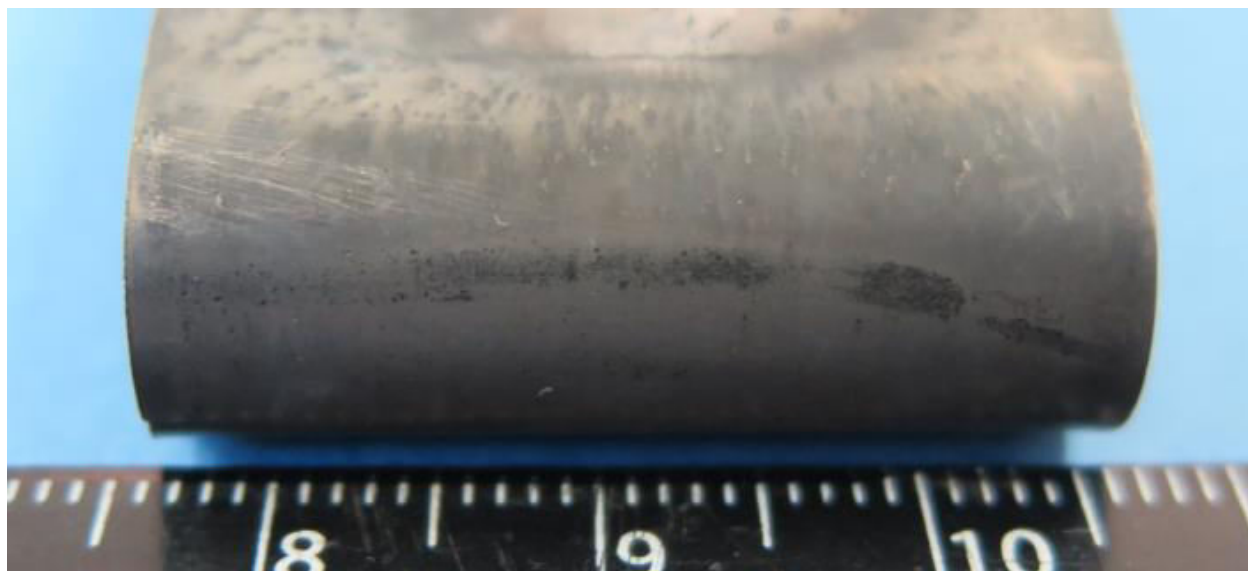
**AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELIK AISI 316 L*****VRSTA NAPREZANJA: ZAOSTALA I NARINUTA***

**Vizualni pregled:** Intenzivna pojava napetosne korozije. Uočljiva je pukotina duž cijele površine ispitnog uzorka.

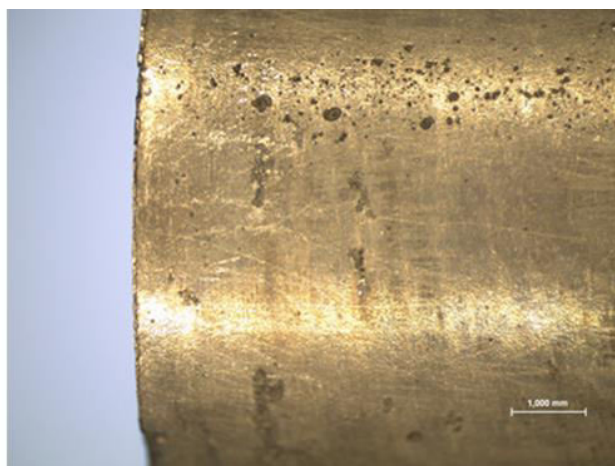


**Stereomikroskopska ispitivanja:** Linijska propagacija pukotine

**Slika 29:** Prikaz rezultata – čelik AISI 316 L sa zaostalim i narinutim naprezanjima.

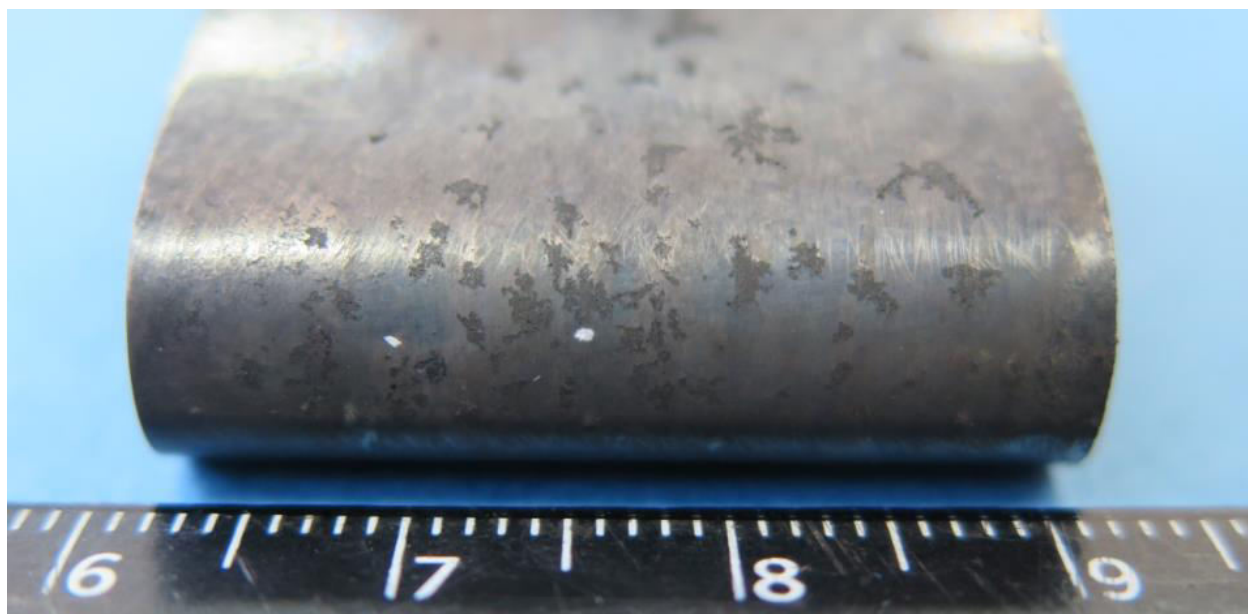
**FERITNI NEHRĐAJUĆI ČELIK AISI 430****VRSTA NAPREZANJA: ZAOSTALA**

**Vizualni pregled:** Iniciranje rupičastih korozijskih oštećenja na površini.

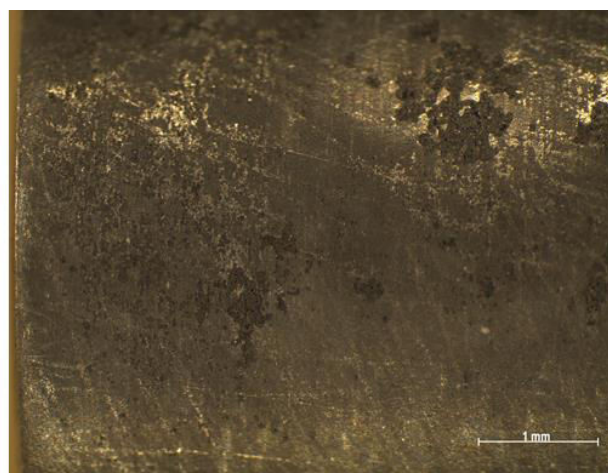
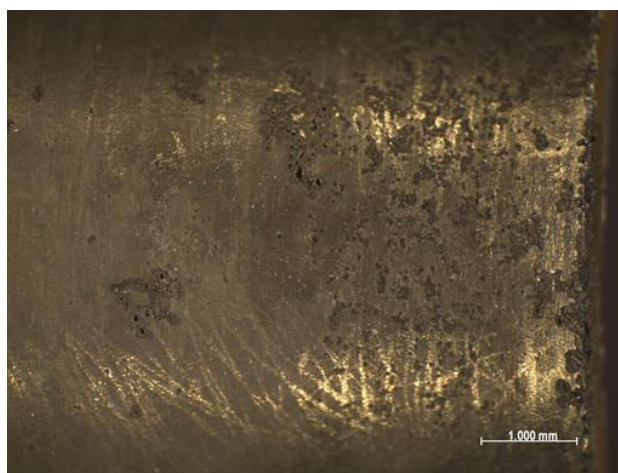


**Stereomikroskopska ispitivanja:** Pojava inicijacije rupičaste korozije – nastale su grupirane nakupine rupica. Ne uočavaju se pukotine izazvane napetosnom korozijom.

**Slika 30:** Prikaz rezultata – čelik AISI 430 sa zaostalim naprezanjima.

**FERITNI NEHRĐAJUĆI ČELIK AISI 430*****VRSTA NAPREZANJA: ZAOSTALA I NARINUTA***

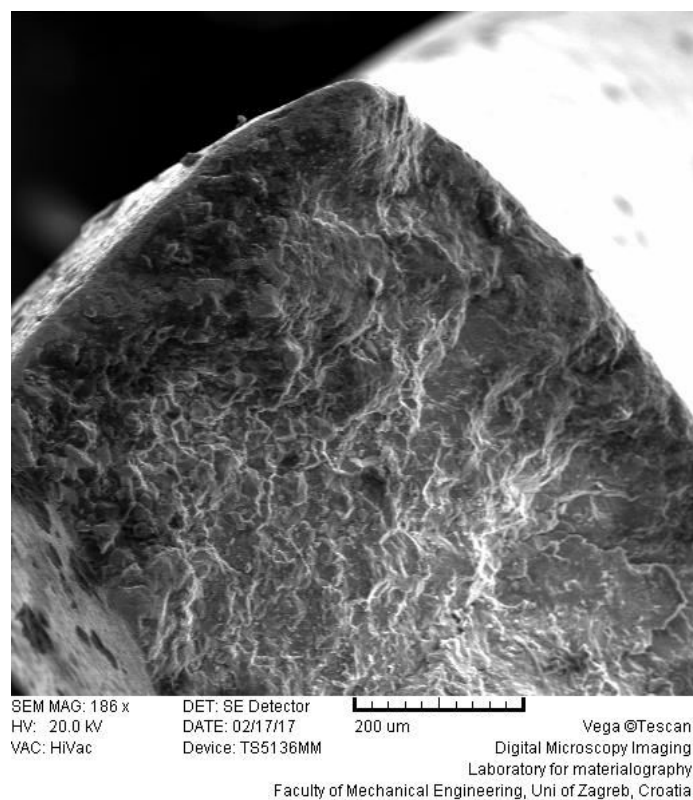
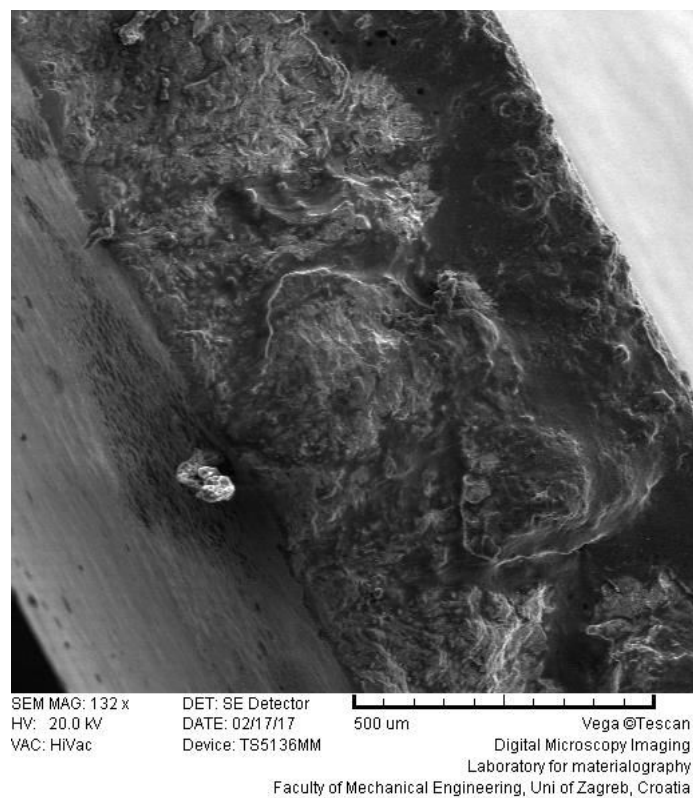
**Vizualni pregled:** Intenzivnija pojava rupičastih korozijskih oštećenja u odnosu na uzorak istog materijala bez narinutih napreznja. Napetosna korozija se ne uočava.



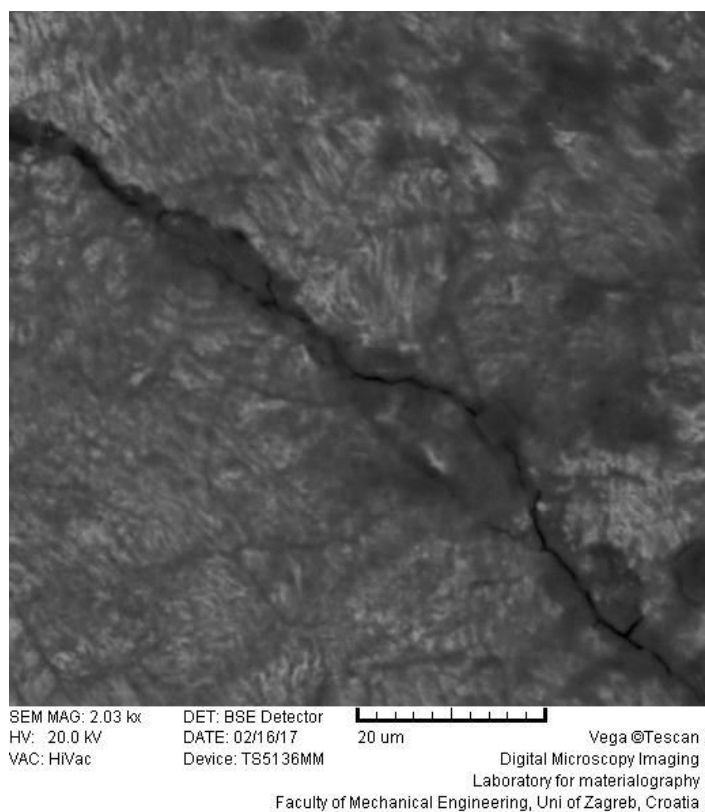
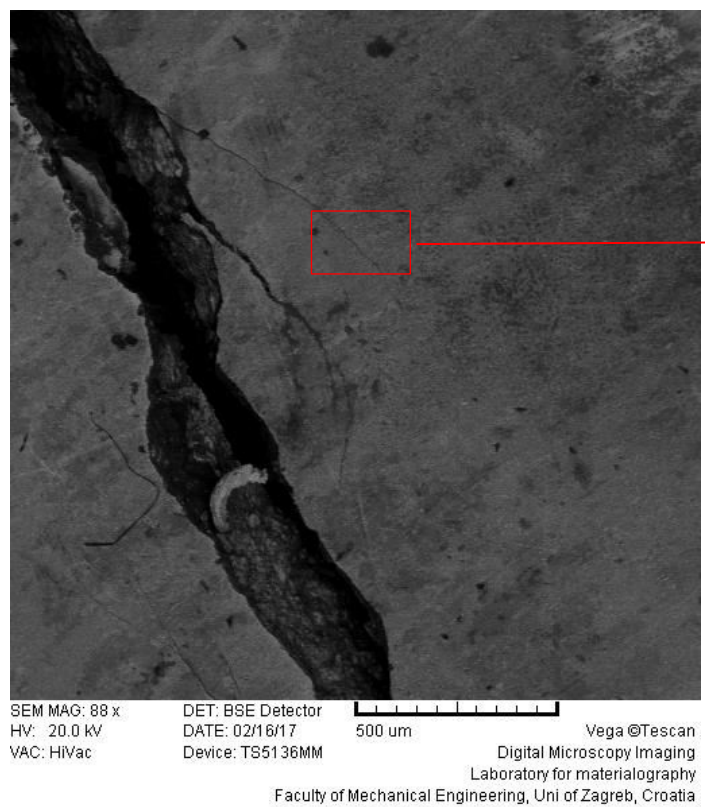
**Stereomikroskopska ispitivanja:** Pukotine izazvane napetosnom korozijom nisu vidljive. Uočavaju se rupičasta korozijska oštećenja.

**Slika 31:** Prikaz rezultata – čelik AISI 430 sa zaostalim i narinutim napreznjima.



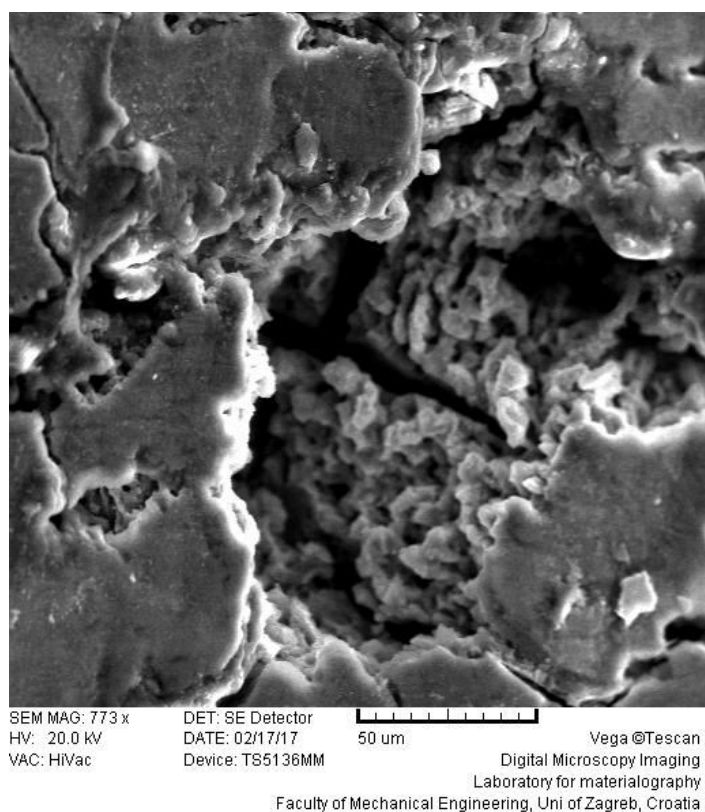
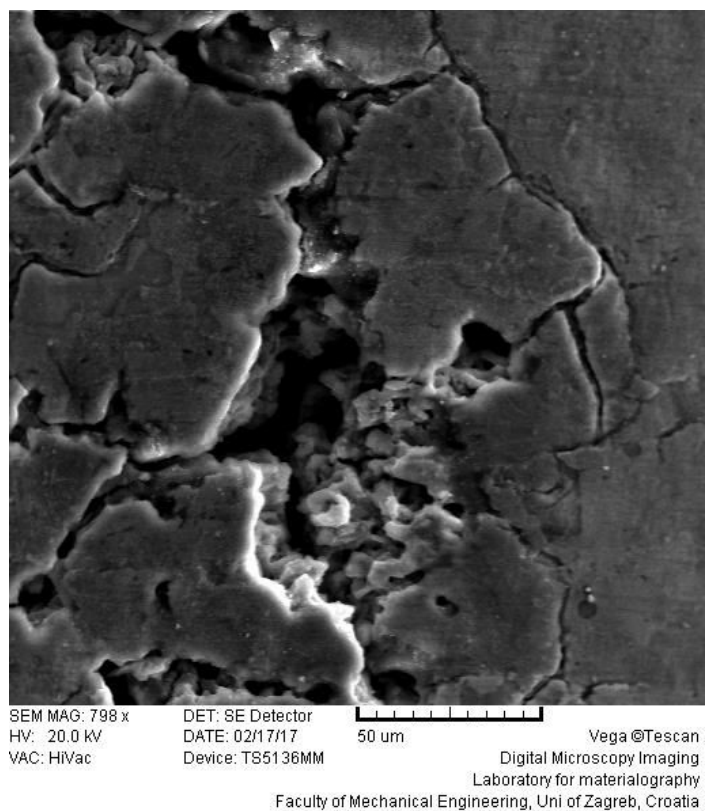


**Slika 32:** SEM snimke površine loma austenitnog nehrđajućeg čelika (AISI 304 L).



**Slika 33:** SEM snimke uzorka od nehrđajućeg čelika (AISI 316 L). Uočljivo je širenje pukotina.





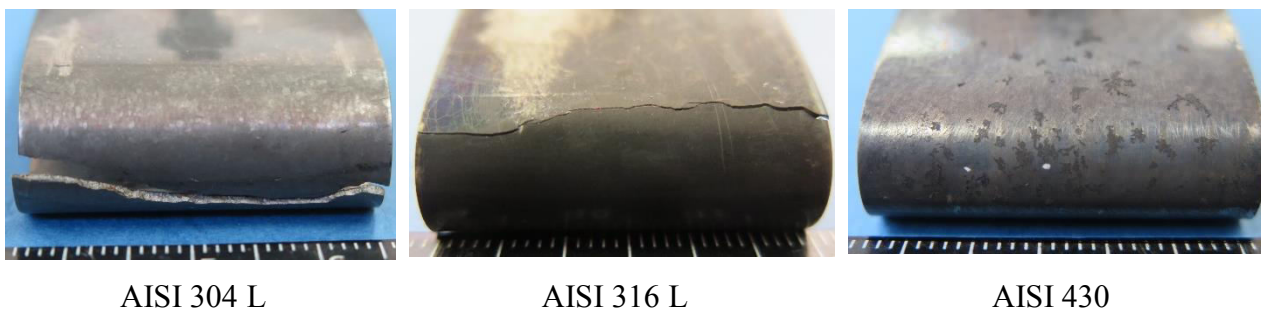
**Slika 34:** SEM snimke površine uzorka feritnog nehrđajućeg čelika (AISI 430) s vidljivim rupičastim korozivnim oštećenjem.

## 5.5. Analiza rezultata

Analizom rezultata provedenog korozijskog ispitivanja otpornosti na pojavu napetosne korozije prema normi ASTM G36-94 može se zaključiti:

- potvrđena je velika sklonost ispitivanih austenitnih nehrđajućih čelika na pojavu napetosne korozije – oštećenja približno istog intenziteta nastala su i na uzorcima izrađenim od čelika AISI 304 L kao i na uzorcima od čelika AISI 316 L koji je radi postizanja veće korozijske otpornosti dodatno legiran s molibdenom
- ispitivani feritni nehrđajući čelik posjeduje visoka svojstva otpornosti na pojavu napetosne korozije
- intenzitet pojave napetosne korozije kod ispitivanih austenitnih nehrđajućih čelika značajno je veći kod uzoraka kod kojih su osim zaostalih naprezanja bila prisutna i narinuta vlačna naprezanja
- utvrđena je sklonost ispitivanog feritnog nehrđajućeg čelika na pojavu iniciranja rupičastih korozijskih oštećenja.

Slikom 35 dodatno je komparativno prikazana utvrđena sklonost austenitnih nehrđajućih čelika na pojavu napetosne korozije te otpornost feritnog čelika na taj mehanizam korozijskog oštećivanja.



**Slika 35:** Komparativni prikaz ispitnih uzoraka s narinutim naprezanjima nakon provedenog korozijskog ispitivanja.

## 6. ZAKLJUČAK

Nehrđajući čelici su postojani na korozijsko oštećivanje zbog postojanja pasivnog filma kromovih oksida na površini materijala. Ukoliko se taj pasivni film nepovratno ošteti, ili dođe do njegovog narušavanja, tj. depasivacije mogu nastati različiti lokalni korozijski oblici koji dovode do mjestimičnog korozijskog oštećivanja, poput rupičaste korozije, korozije u procjepu, interkristalne i napetosne korozije. Iako se ovi čelici ne upotrebljavaju u većem udjelu u izradi zrakoplova, različite vrste nehrđajućih visokolegiranih čelika koriste se za izradu pojedinih komponenti letjelica. Zabilježeni su brojni slučajevi korozijskog oštećivanja pojedinih zrakoplovnih dijelova izrađenih od nehrđajućih čelika koji su ponekad uzrokovali i vrlo ozbiljne nesreće. Posebno opasan oblik lokalnog razaranja predstavlja napetosna korozija jer dovodi do iznenadnih puknuća. Različite vrste nehrđajućih čelika, ovisno o njihovom kemijskom sastavu i strukturi posjeduju i različitu otpornost na napetosnu koroziju. Austenitni nehrđajući čelici su podložni toj vrsti korozije, za razliku od feritnih i duplex čelika.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je korozijsko ispitivanje otpornosti različitih vrsta austenitnog nehrđajućeg čelika (AISI 304L, AISI 316L) te feritnog nehrđajućeg čelika (AISI 430) na pojavu napetosne korozije prema normi ASTM G36-94. Rezultati provedenog ispitivanja potvrdili su veliku sklonost austenitnih nehrđajućih čelika na napetosnu koroziju pogotovo kod ispitnih uzoraka kod kojih su osim zaostalih naprezanja bila prisutna i narinuta naprezanja. Utvrđena je i postojanost ispitivanog feritnog čelika na pojavu napetosne korozije.

Eksperimentalni dio je potvrdio teoretske spoznaje o napetosnoj koroziji nehrđajućih čelika koji se koriste u zrakoplovnoj industriji. Kako zrakoplovi prelaze velike udaljenosti izloženi su raznim agresivnim okruženjima. Stoga komponente izrađene od nehrđajućih čelika mogu biti podložne nastanku napetosne korozije o čemu treba voditi računa počevši od projektiranja i odabira materijala do redovitog održavanja tijekom životnog vijeka zrakoplova.

## LITERATURA

- [1] Pierre R. Roberge: „Handbook of corrosion engineering“, McGraw-Hill, New York, 1999.
- [2] Zoran C. Petrović: „Catastrophes caused by corrosion“, Vojnotehnički glasnik, 2016.
- [3] R. Wanhill: „Istraživanje u nacionalnoj vazduhoplovnoj laboratoriji (NLR) značajnih eksploatacijskih otkaza vazduhoplova“, National Aerospace Laboratory NLR, Amsterdam, 2009.
- [4] <http://impact.nace.org/documents/ccsupp.pdf>, preuzeto 21.02.2017.
- [5] <http://corrosion.org/>, preuzeto 22.02.2017.
- [6] M. Novosel, D. Krumes: „Posebni čelici“, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [7] [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF Stainless Steel in Figures 2016 English Public.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF%20Stainless%20Steel%20in%20Figures%202016%20English%20Public.pdf), preuzeto 21.02.2017.
- [8] Priručnik „Handbook of stainless steel“, Outokumpu, 2013.g.
- [9] J. R. Davis: „Stainless steels“, ASM International, Materials Park, 1994.
- [10] <http://aircraftproducts.wicksaircraft.com/viewitems/aircraft-metal-tubes-channels-angles/1-tubes-channels-angles-304-stainless-steel-tubing>, preuzeto 10.02.2017.
- [11] Priručnik „High-Performance Stainless Steel“, Nickel Development Institute, Birmingham, 2000.
- [12] [http://www.aksteel.co.uk/1-products/1-stainless-sheet-and-strip/0-ferritic-stainless- steels.html](http://www.aksteel.co.uk/1-products/1-stainless-sheet-and-strip/0-ferritic-stainless-steels.html), preuzeto 09.02.2017.
- [13] <https://www.thermofisher.com/blog/metals/infographic-martensitic-stainless-steels/>, preuzeto 09.02.2017.
- [14] <http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php>, preuzeto 09.02.2017.
- [15] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: „Svojstva i primjena materijala“, FSB, Zagreb, 2013.
- [16] D. Čorić, T. Filetin: „Materijali u zrakoplovstvu“, FSB, Zagreb, 2012.
- [17] R. H. Jones: „Stress Corrosion Cracking“, 1992.
- [18] <http://www.j4stainless.com/info.html>, preuzeto 09.02.2017.

- [19] <http://www.aircraftspruce.com/catalog/appages/qs200.php?clickkey=3096717>, preuzeto 10.02.2017.
- [20] <http://aircraftproducts.wicksaircraft.com/item/all-categories/2600-2700-airloc-fastener-stainless-steel/al2600-1s>, preuzeto 10.02.2017.
- [21] <http://www.koolkrew.com/steel-cable-loopsnickel-p-853.html>, preuzeto 20.02.2017.
- [22] <http://www.worldstainless.org/statistics>, preuzeto 23.02.2017.
- [23] Priručnik „Corrosion handbook for Stainless Steels“, Avesta Schefffield AB Stockholm, 1994.g.
- [24] Priručnik: „Corrosion Handbook“, Outokumpu, 2015.
- [25] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=pitting\\_corrosion](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=pitting_corrosion), preuzeto 12.02.2017.
- [26] <https://engineeringdegradation.wordpress.com/tag/microbial/>, preuzeto 12.02.2017.
- [27] <http://faculty.kfupm.edu.sa/ME/hussaini/Corrosion%20Engineering/04.06.03.htm>, preuzeto 12.02.2017.
- [28] S. D. Cramer, B. S. Covino: „Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Volume 13A“, ASM International, Materials Park, Ohio, 2003.
- [29] P. A. Schweitzer: „Encyclopedia Of Corrosion Technology“, Marcel Dekker, New York, 1998.
- [30] <http://www.testmetals.com/photo-gallery/failure-analysis-corrosion/16678249?originalSize=true>, preuzeto 15.02.2017.
- [31] <https://abduh137.wordpress.com/2008/01/20/corrosion-morphology/>, preuzeto 15.02.2017.
- [32] Australian Government, Civil Aviation Safety Authority: „Airworthiness Bulletin, Control Cable Terminal – Retirement“, 2016.g.
- [33] <http://niekvanderzande.nl/wordpress/tag/f-16/>, preuzeto 14.02.2017.
- [34] [http://www.shbh.nl/historie/75jaar/pagina\\_11.htm](http://www.shbh.nl/historie/75jaar/pagina_11.htm), preuzeto 14.02.2017.
- [35] R. J. H. Wanhill: „Aircraft Crash Caused by Stress Corrosion Cracking“, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996.